

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**О. П. Колосова, В. В. Ванін,
О. Є. Колосов, В. І. Сівецький**

УЛЬТРАЗВУКОВА ОБРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИРОВИНИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Затверджено Вченою радою КПІ імені Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для аспірантів,
які навчаються за спеціальністю
«Галузеве машинобудування»*

(електронне видання)

Київ
КПІ імені Ігоря Сікорського
2017

УДК 678.5.05:004.925.8
ББК 35.71/73

*Затверджено Вченою радою
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(протокол № 6 від 12.06.2017р.)*

Рецензенти:

*Назаренко І.І., д-р техн. наук, проф.,
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ,*

*Пащенко Є.О., д-р техн. наук, проф.,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України,*

*Петухов А.Д., д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Відповідальний редактор

*Панов Є.М., д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Колосова О.П., Ванін В.В., Колосов О.Є., Сівецький В.І.

Ультразвукова обробка технологічної сировини полімерних композиційних матеріалів : навчальний посібник [електронне видання] [для підготовки аспірантів, які навчаються за спеціальністю «Галузеве машинобудування»] / О. П. Колосова, В. В. Ванін, О. Є. Колосов, В.І. Сівецький. – К.: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2017. – 188 с.

Наведено загальні відомості про епоксидні полімери та технологію одержання полімерних композиційних матеріалів на їх основі. Проаналізовано типовий технологічний цикл одержання орієнтованих волокнистих композиційних матеріалів. Описано методи модифікації рідких епоксидних композицій та проаналізовано ефективність їх ультразвукової модифікації. Розглянуто широке коло питань, що стосуються моделювання технологічних параметрів базових процесів формування та конструктивних елементів формуючого технологічного ультразвукового обладнання, призначеного для приготування полімерних композицій та виготовлення високоміцних й бездефектних виробів із реактопластичних традиційних композитів у хімічній, машинобудівній та інших галузях промисловості.

Досліджено конструктивно-технологічні параметри формуючого ультразвукового обладнання у вигляді хвилеводів-концентраторів та складеного дозувального пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною. Наприкінці посібника наведені запитання для самоконтролю.

Для підготовки аспірантів, які навчаються за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування та споріднених спеціальностей: машинобудівної, хімічної, будівельної галузей промисловості. Навчальна дисципліна – «Ультразвукова обробка технологічної сировини полімерних композиційних матеріалів».

УДК 678.5.05:004.925.8
ББК 35.71/73

© О.П. Колосова, В.В. Ванін, О.Є. Колосов, В.І. Сівецький 2017
© КПІ імені Ігоря Сікорського 2017

Колосова Е.П., Ванин В.В., Колосов А.Е., Сивецкий В.И.

Ультразвуковая обработка технологического сырья полимерных композиционных материалов: учебное пособие [электронное издание] [для подготовки аспирантов, которые обучаются по специальности «Отраслевое машиностроение»] / Е. П. Колосова, В. В. Ванин, А. Е. Колосов, В. И. Сивецкий. – К.: КПИ имени Игоря Сикорского, 2017. – 188 с.

Приведены общие сведения об эпоксидных полимерах и технологии получения полимерных композиционных материалов на их основе. Проанализирован типичный технологический цикл получения ориентированных волокнистых композиционных материалов. Описаны методы модификации жидких эпоксидных композиций и проанализирована эффективность их ультразвуковой модификации.

Рассмотрен широкий круг вопросов, касающихся моделирования технологических параметров базовых процессов формования и конструктивных элементов формующего технологического ультразвукового оборудования, предназначенного для приготовления полимерных композиций, а также изготовления высокопрочных и бездефектных изделий из реактопластичных традиционных композитов в химической, машиностроительной и других отраслях промышленности. Исследованы конструктивно-технологические параметры формующего ультразвукового оборудования в виде волноводов-концентраторов и составного дозирующего устройства с прямоугольной излучающей пластиной. В конце пособия приведены вопросы для самоконтроля.

Для подготовки аспирантов, которые обучаются по специальности «Отраслевое машиностроение» и родственных специальностей: машиностроительной, химической, строительной отраслей промышленности. Учебная дисциплина – «Ультразвуковая обработка технологического сырья полимерных композиционных материалов».

Kolosova E.P., Vanin V.V., Kolosov A.E., Syvetskii V.I.

Ultrasonic processing of technological raw materials of polymeric composite materials: a textbook [electronic edition] [for the training of applicants of PhD degree on specialty «Branch machine building»] / E.P. Kolosova, V.V. Vanin, A.E. Kolosov, V.I. Syvetskii. – K: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. – 188 p.

General information about epoxy polymers and technologies for producing polymer composite materials on their basis are given. A typical technological cycle for obtaining oriented fibrous composite materials was analyzed. Methods for the modification of liquid epoxy compositions are described and the efficiency of their ultrasonic modification are analyzed.

A wide range of issues related to the modeling of technological parameters of basic molding processes and structural elements of the forming technological ultrasonic equipment intended for the preparation of polymer composites is considered, as well as the manufacture of high-strength and defect-free products from thermosetting traditional composites in the chemical, engineering and other industries. The design and technological parameters of the shaping ultrasonic equipment in the form of wave guides-concentrators and a composite metering device with a rectangular radiating plate were studied. At the end of the manual are questions for self-control.

For the training of applicants of PhD degree on specialty «Branch machine building» and related specialties: engineering, chemical and construction industries. The academic discipline is «Ultrasonic processing of technological raw of polymer composite materials».

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВН	–	волокнистий наповнювач
ЕБК	–	елементарна базисна комірка
ЕЗ	–	епоксидне зв'язуюче
ЕК	–	епоксидна композиція
ЕП	–	епоксидний полімер
ЕС	–	епоксидна смола
КВМ	–	композиційно-волокнистий матеріал
ПКМ	–	полімерний композиційний матеріал
ОВН	–	орієнтований волокнистий наповнювач
ПЕП	–	п'єзоелектричний (п'єзокерамічний) перетворювач
ПЗ	–	полімерне зв'язуюче
ПМС	–	магнітострикційний перетворювач
СПГМ	–	структурно-параметричне геометричне моделювання
УЗ	–	ультразвук
УЗГ	–	ультразвуковий генератор
УЗК	–	ультразвукові коливання

ВСТУП

Останнім часом у багатьох галузях промисловості (авіаційній, ракетно-технічній, машинобудівній, суднобудівній, електротехнічній, автомобільній та ін.), у сільському господарстві, вітроенергетиці, медицині, спортивній індустрії тощо значно збільшилось використання різноманітних конструкцій та виробів з високоміцних реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів (КВМ), одержуваних методом «мокрого» намотування безперервного армуючого наповнювача (орієнтованого волокнистого наповнювача – ОВН), просоченого рідким полімерним зв'язуючим (ПЗ) [1 – 3].

Слід також зазначити, що останнім трендом у полімерному матеріалознавстві є розроблення енергоощадних і високопродуктивних технологій та обладнання для одержання інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів (ІПКМ) та подальшого виготовлення на їх основі широкого спектру високоміцних конструкційних виробів спеціального (подвійного) призначення, зокрема, з ефектом пам'яті або здатності контролю н.д.с. відповідальних елементів конструкцій для авіакосмічної техніки літакобудування, суднобудування тощо.

Важливим чинником є інтенсифікація технологічних процесів формування бездефектних і високоміцних КВМ (ІПКМ) при одночасному зниженні енергоємності та досягненні енергоресурсозбереження формування КВМ (ІПКМ). Це досягається, наприклад, шляхом застосування низькочастотного ультразвуку (УЗ) [4 – 8].

Тому вибір і обґрунтування параметрів одержання КВМ, а також конструктивних параметрів технологічного обладнання, мають принципове значення при виготовленні конструкційних виробів з таких КВМ. Це зумовлює актуальність автоматизованого проектування досліджуваних технологій та обладнання для їх виробництва [1].

Протягом останніх десятиріч цей напрямок конструкторсько-технологічного проектування розвивається досить активно. Проте у багатьох випадках, незважаючи на досягнутий прогрес у виконаних дослідженнях щодо проектування ряду технологічних операцій і обладнання для виготовлення КВМ, й дотепер відсутня ґрунтовна теоретична та експериментальна база для автоматизованого проектування т.зв. «базових» процесів і технологічного обладнання, що використовується при їх реалізації.

Для обґрунтованого вибору на стадії конструкторсько-технологічного автоматизованого проектування оптимальних технологічних параметрів базових процесів і геометричних параметрів (конструктивних елементів) технологічного обладнання, призначеного, зокрема, для виготовлення виробів з КВМ, доцільним є використання широкого спектру методів моделювання (геометричного та комп'ютерного, [9 – 12], а також експериментально-статистичного [13 – 14]). Це дозволяє істотно скоротити спектр необхідних експериментів, а також суттєво зменшити фінансові та часові витрати на їх проведення [13].

У свою чергу, знайдені оптимальні геометричні параметри УЗ-

обладнання й інструментів, а також модельні технологічні параметри процесу УЗ-обробки, серед яких частота, амплітуда, інтенсивність, час, можуть використовуватись для автоматизованого проектування використовуваного УЗ-технологічного обладнання (хвильоводів-концентраторів, просочувального й дозувального обладнання на базі магнітострикційних перетворювачів (ПМС) або складених п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) тощо) [4 – 5].

Одним з ефективних інструментаріїв геометричного моделювання таких об'єктів є методологія структурно-параметричного геометричного моделювання (СПГМ). Цей напрям протягом останніх десятиріч успішно розробляється на кафедрі нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки КПІ імені Ігоря Сікорського під науковим керівництвом професорів Ваніна В.В. та Вірченко Г.А. Тому є доцільним його розповсюдження й на технічні засоби одержання високоміцних й бездефектних реактопластичних КВМ (ІПКМ).

Проте складність досліджуваної проблеми геометричного моделювання технічних засобів одержання реактопластичних КВМ (ІПКМ) обумовлена тим, що основні формоутворювальні елементи цих технічних засобів та реалізуючих їх технологічних процесів характеризуються нестаціонарністю й стохастичністю.

У свою чергу, оптимізація параметрів використовуваного технологічного УЗ-обладнання пов'язана зі складністю і необхідністю врахування та параметризації конструкторсько-технологічних параметрів формування КВМ.

Тому не дивно, що існуючі теоретичні та експериментальні роботи з геометричного моделювання окремих процесів та обладнання для виготовлення реактопластичних КВМ стосуються переважно автоматизації стаціонарного намотувального обладнання шляхом геометричного моделювання процесу намотування та викладення, зокрема, дослідження форми поверхні полімерної стрічки з волоконних оправок різної форми при виробництві композитних деталей. Більш детально напрацювання здобувачів з тематики буде наведено у розділі 1.

Аналіз типового циклу одержання КВМ, армованих ВН, з використанням інтенсифікуючої УЗ-технології, дозволяє, зокрема, виокремити такі три укрупнені групи об'єктів геометричного моделювання (див. розділ 2): 1) УЗ-інструменти для приготування та озвучування рідких ПЗ (насамперед епоксидних зв'язуючих – ЕЗ); 2) технологічні параметри базового процесу «вільного» просочування ВН озвученим ПЗ; 3) УЗ-обладнання для дозування вмісту ПЗ у просоченому ВН (базовий процес дозованого нанесення).

Незважаючи на те, що весь цикл формування КВМ не обмежується цими трьома групами об'єктів, вони є основоположними для одержання високоякісних (бездефектних) і високоміцних кінцевих затверділих намотувальних виробів з реактопластичних КВМ [1].

Під час дослідження першої з вищезазначених груп об'єктів, а саме УЗ-інструментів для приготування та озвучування ПЗ, актуальною є задача розрахунків та геометричного конструювання хвильоводів і концентраторів УЗ-технологічного обладнання різноманітного призначення, пов'язана з

особливостями розповсюдження коливань у стрижневих системах [4 – 5]. При цьому не менш важливим є формулювання загального підходу до розроблення алгоритму конструювання хвилеводів-концентраторів УЗ на методології СПГМ з урахуванням початкових умов (особливостей технологічних процесів їх виготовлення).

Друга група вищезазначених об'єктів передбачає геометричне та комп'ютерне моделювання базового процесу «вільного» просочування, що йде першим у технологічному циклі [1], для подальшого моделювання кінетичних параметрів одного з головних базових процесів формування КВМ.

Таке моделювання, насамперед, пов'язане з визначенням геометричних та структурних характеристик ОВН як капілярно-пористого тіла, зокрема, знаходженням ефективного (еквівалентного) капілярного радіусу ОВН як циліндричного капіляра, а також моделювання й комп'ютерна візуалізація параметрів процесу «вільного» просочування полімерної рідини у капілярно-пористому тілі з експериментальною перевіркою отриманих аналітичних співвідношень.

За розроблюваним підходом геометричне моделювання базового процесу «вільного» просочування пов'язане з дослідженням стохастичного розподілу орієнтованих (односпрямованих) волокон та міжволоконного простору (що уособлює множину капілярів капілярно-пористого тіла) у мікроструктурі односпрямованих КВМ.

Адже від характеру розподілу волокон в геометричній структурі таких композитів (в рамках розгляду т.зв. структурного підходу [15]) залежать як модельні технологічні параметри процесу «вільного» просочування орієнтованого ВН (далі – ОВН) рідким ПЗ, геометричні параметри змотувального й просочувального обладнання, так і кінцеві властивості міцності затверділого композиту [16].

У свою чергу, аналіз стохастичного розподілу волокон і міжволоконного простору у структурі просочуваних ОВН доцільно здійснювати з використанням апарату теорії інтегральної геометрії та геометричних ймовірностей для знаходження адекватної функції розподілу досліджуваних геометричних параметрів капілярно-пористих тіл.

При проектуванні третьої групи досліджуваних об'єктів, а саме складеного УЗ-дозувального обладнання, також доцільним є використання методів геометричного та комп'ютерного моделювання параметрів складеного УЗ-дозуючого кавітаційного пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною, що використовується для виготовлення полімерних виробів на основі тканин.

Наочності отриманим результатам моделювання надає параметрична візуалізація розроблюваної методики та реалізуючого її алгоритму варіантного комп'ютерного конструювання досліджуваних складених УЗ-кавітаційних пристроїв, що сприяють інтенсифікації різноманітних технологічних процесів [17 – 18]. Застосовувані при цьому прийоми проектування базуються на використанні розроблюваних параметричних геометричних моделей, які наочно

відображають існуючі варіаційні взаємозв'язки між елементами конструкцій створюваних виробів.

Дослідження комплексу вищезначених питань та їх впровадження на підприємствах хімічної і машинобудівної промисловості України дозволить у значній мірі вирішити важливу науково-прикладну проблему, пов'язану з геометричним та комп'ютерним моделювання параметрів базового процесу «вільного» просочування та оптимізації параметрів використовуваного інтенсифікуючого УЗ-обладнання, призначеного для одержання високоміцних й бездефектних намотувальних конструкцій з реактопластичних КВМ, армованих неперервними ВН [19 – 150].

Навчальний посібник складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та шести додатків.

У першому розділі наведено загальні відомості про епоксидні полімери, технологію одержання полімерних композиційних матеріалів на їх основі та ультразвукову модифікацію.

У другому розділі наведено аналіз перспективності конструкторсько-технологічного проектування технічних засобів для одержання реактопластичних КВМ на базі структурно-параметричного моделювання.

У третьому розділі обґрунтовано запропоноване розбиття технологічної схеми інноваційного одержання реактопластичних КВМ з використанням УЗ на окремі структурні елементи (що уособлюють базові процеси) та наведено аналіз формоутворювальних елементів, що входять до їх складу, з позицій системного підходу та методології СПГМ.

У четвертому розділі досліджуються питання застосування методології СПГМ для оптимізації конструкції хвилеводів-концентраторів УЗ-технологічного обладнання.

П'ятий розділ присвячений геометричному та комп'ютерному моделюванню базового процесу «вільного» просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими.

У шостому розділі досліджуються особливості геометричного та комп'ютерного моделювання параметрів складеного УЗ-дозуючого кавітаційного пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною.

У сьомому розділі наведено приклади практичної адаптації методології СПГМ при одержанні реактопластичних КВМ.

У шести додатках А – Ж розглянуто ряд методичних і прикладних питань.

Додатку А описується оптимізація технологічних параметрів процесу озвучування УЗ-концентраторами рідких ЕЗ із використанням експериментально-статистичного моделювання.

У додатку Б розглядаються питання аналітичного отримання прогностичного кінетичного рівняння процесу просочування ОВН рідкими ЕК.

У Додатку В описуються методики аналітичного розрахунку резонансних акустичних розмірів складаючих елементів УЗ-обладнання, призначеного для дозованого нанесення рідких ЕЗ на просочені ткани ВН, а також визначення

контрольованих технологічних параметрів УЗ.

У Додатку Д наводяться довідкові матеріали з оптимізації конструкцій трансформаторів швидкості ультразвукового технологічного обладнання.

У Додатку Е подані співвідношення, що використовувались при проведенні комп'ютерного моделювання з детермінування розподілу відстаней між сусідніми колами в модельній решітчастій площині.

У Додатку Ж описуються особливості технологічних засад, що забезпечують енергоощадність процесів об'ємного озвучування, просочування волокнистих наповнювачів і дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих з використанням ультразвуку.

Розв'язок досліджуваних у навчальному посібнику задач науково-технічного характеру буде сприяти підвищенню інформованості студентів щодо питань забезпечення ефективності базових процесів та продуктивності обладнання для одержання виробів із КВМ та застосуванням УЗ, що, у свою чергу, забезпечить значну економію енергоресурсів, а також поліпшить екологічну обстановку й умови техніки безпеки при виробництві полімерних виробів.

Це, в кінцевому результаті, буде сприяти економічному та соціальному прогресу в Україні завдяки підвищенню якості підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії у вищих навчальних закладах, які навчаються за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕПОКСИДНІ ПОЛІМЕРИ, ТЕХНОЛОГІЮ ОДЕРЖАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ОСНОВІ ТА УЛЬТРАЗВУКОВУ МОДИФІКАЦІЮ

У цьому розділі наводяться загальні відомості про епоксидні полімери та технологію одержання полімерних композиційних матеріалів на їх основі. Коротко описується типовий технологічний цикл одержання орієнтованих волокнистих композиційних матеріалів. Описуються методи модифікації рідких епоксидних композицій. Аналізується ефективність ультразвукової модифікації рідких реактопластичних композицій.

1.1. Загальні відомості про епоксидні полімери

ЕП відносяться до класу органічних сполук, до складу молекулярного ланцюга яких входять атоми вуглецю, а також можуть входити атоми водню, кисню, азоту, сірки, галогенів. ЕП є типовими представниками сітчастих або просторово зшитих полімерів, тобто полімерів, що складаються з довгих молекулярних ланцюгів, сполучених між собою поперечними хімічними зв'язками [2, 41].

При одержанні полімерів сітчастої будови протікає реакція зшивання (структурування або твердіння) ЕО з твердником, тобто реакція утворення поперечних хімічних зв'язків між макромолекулами. Після твердіння ЕП утворюється просторова сітка, що накладає обмеження на переміщення макромолекул між собою. Внаслідок цього при нагріванні ЕП, на відміну від термопластів, не розм'якшуються, тобто для них не відбувається переходу з твердого у пластичний стан.

Перехід полімерів з в'язкотекучого або вискоеластичного стану у склоподібний називається склуванням і характеризується температурою склування полімеру T_c . Температура склування є важливою експлуатаційною характеристикою полімерних матеріалів, оскільки вона відповідає верхній межі їх теплостійкості.

ЕО – це олігомери або мономери, що містять в молекулі не менше двох епоксидних або гліцидилових груп, які розташовуються на кінцях або уздовж основного ланцюга молекули, чи в кільці аліциклу:



Завдяки високій реакційній здатності епоксидні групи взаємодіють з багатьма поліфункціональними з'єднаннями з утворенням полімерів просторової (сітчастої) будови.

У науковій і технічній літературі поняття «епоксидні смоли» або «ЕО» включають індивідуальні з'єднання, олігомери і деякі лінійні полімери [2, 41].

1.2. Коротка класифікація і типові склади епоксидних з'єднань

В даний час випускається більше 30 марок литєвих і просочувальних ЕО. Найбільше розповсюдження здобули епоксидно-діанові олігомери, унаслідок чого їх випуск в загальному обсязі виробництва складає більше 90%. При цьому розроблено більше ста марок твердників для епоксидних олігомерів. Також проводяться розробки в галузі створення нових типів ЕП і їх твердників [2, 41].

Існують різні класифікації ЕО [2]. Виходячи з хімічної будови, за типом епоксидних груп розрізняють дві основні групи ЕО:

- 1) *I* – епоксидна група входить до складу аліфатичного ланцюга;
- 2) *II* – епоксидна група пов'язана з аліфатичним п'яти- або шестичленним циклом.

Також можна виділити *III* групу епоксидних з'єднань, що включає епоксидні групи різної реакційної здатності (із змішаною функціональністю).

Також епоксидні з'єднання класифікують:

- за молекулярною масою M_n : низькомолекулярні ($M_n < 900$), середньомолекулярні ($M_n = 900 - 2000$), високомолекулярні ($M_n = 2000 - 4300$);
- за фізичним станом: рідкі (ЕО з $M_n < 800$), тверді (ЕО з $M_n > 800$);
- за функціональністю: бі- та поліфункціональні.

ЕО знайшли широке застосування в різних галузях техніки при виробництві ПКМ. Композити на основі ЕО використовуються при виготовленні несучих конструктивних елементів будівель і споруд, захисно-конструкційних, гідроізоляційних і декоративних покриттів, облаштуванні підлог і штукатурних покриттів із спеціальними властивостями, ремонті покриттів доріг й ін.

Відмічена висока ефективність їх застосування при реконструкції і ремонті будівель, відновленні і посиленні будівельних конструкцій, облаштуванні стиків збірних елементів, при захисті конструкцій від дії навколишнього середовища і т.д. [2].

Завдяки унікальному поєднанню комплексу експлуатаційних властивостей, таких, як високі міцнісні характеристики, гарна адгезія до різних матеріалів, висока стійкість до дії агресивних середовищ й ін., епоксидні ПКМ значно перевершують традиційні склади, що містять мінеральні в'язучі, а також матеріали на основі інших синтетичних смол (поліефірних, фуранових, карбамідних і ін.). Так, міцність при розтягуванні затверділих ЕП може досягати 150 МПа, при стисненні – 400 МПа, при вигині – 220 МПа, модуль пружності – 5000 МПа.

У процесі експлуатації епоксидні розчини піддають комплексу зовнішніх дій – навантаженню, температурі, дії агресивного середовища і т.д., що може призвести до зниження первинних експлуатаційних властивостей або навіть руйнування матеріалу. Тому з практичної точки зору важливим питанням при проектуванні виробів і конструкцій із застосуванням епоксидних композитів і визначенні допустимої сфери їх застосування є прогнозування їх працездатності (довговічності) у виробках і конструкціях.

ЕО набувають технічно важливих властивостей в результаті перетворення на сітчастий полімер (завдяки реакції твердіння). Твердниками ЕО слугують індивідуальні з'єднання або їх суміші, олігомери, а також суміші речовин різних молекулярних мас з різними реакційними групами.

Хімічна взаємодія твердників з ЕО може відбуватися як по епоксидних, так і по гідроксильних групах. Твердіння може бути здійснене речовинами лужного (аміни, аміді, основи Льюїса) або кислотного характеру (ангідриди кислот, феноли, кислоти Льюїса). Багато зшиваючих агентів в певних умовах надають каталітичну дію (імідазоли, основи Маніха, третинні аміни).

По механізму процесу твердіння твердники ЕО можна розподілити на дві групи [2].

Перша група – твердники поліконденсаційної дії (зшиваючі агенти, які вступають в реакцію поліконденсації з ЕО, що супроводжується виділенням простих низькомолекулярних з'єднань (води, хлористого водню, аміаку й ін.).

Друга група – твердники дії полімеризації (каталітичного) (каталізатори, що викликають полімеризацію епоксидних груп, яка не супроводжується виділенням побічних продуктів і яка протікає без зміни елементарного складу).

Твердіння діанових ЕО молекулярною масою до 1000 найчастіше проводять поліетиленполіаміном або гексаметилендіаміном. Життєздатність композицій з такими твердниками при 15–25 °С складає 1–3 год, тривалість твердіння – близько 24 год. Реакція ЕО з аліфатичними поліамінами екзотермічна – температура саморозігріву тверднучих композицій може перевищити 200 °С.

Недоліком ЕП, затверділих аліфатичними поліамінами, є висока крихкість і наявність значних внутрішніх напруг у полімері після твердіння. Для холодного твердіння ЕО також використовують олігоаміноаміді – продукти конденсації поліетиленполіамінів з полімеризованими кислотами рослинних олив. ЕП, затверділі олігоаміноамідами, є еластичнішими.

Для гарячого твердіння (з підведенням тепла) ЕО з молекулярною масою до 1000 застосовують ароматичні ді- і поліаміни (м-фенілендіамін і ін.), а також ангідриди дікарбонових кислот (фталевий, малеїновий ангідрид і ін.). Твердіння проводять при температурах 100 – 180°С протягом 8 – 24 год. Продукти твердіння відрізняються високою механічною міцністю, хорошими електричними властивостями, тепло- і хімічною стійкістю. Такі твердники застосовують у складі зв'язуючих для багатокомпонентних пластиків.

Для гарячого твердіння ЕО з молекулярною масою більше 1000 застосовують синтетичні смоли – феноло-формальдегідні (резольні і новолачні), мочевино- і меламіно-формальдегідні. Твердники цього типу використовуються у складі лакофарбних матеріалів, клеїв і зв'язуючих.

Для твердіння ЕО по механізму полімеризації найширше застосовують триетаноламін, триетаноламінотитанат, кислоти Льюїса та ін. Епоксидні композиції з полімеризаційними твердниками відрізняються підвищеною адгезією до металів і скла. Їх використовують як клеї і зв'язучі для багатокомпонентних пластиків.

Також до складу багатокомпонентного ЕП, крім власне полімеру, входять наповнювачі, стабілізатори, пластифікатори, згущувачі, тиксотропні добавки та інші компоненти, що виконують певні функції.

Вибір основних компонентів волокнистих ЕП визначається необхідними функціональними вимогами, експлуатаційною надійністю цих композитів, сумісністю компонентів, технологічністю переробки, доступністю і вартістю.

Армуючі волокнисті напівфабрикати (АВП) є проміжними матеріалами, що містять задану кількість волокнистого наповнювача і полімерної матриці. АВП є зручною випускною формою напівфабрикатів. На їх основі різними методами переробки одержують композиційні матеріали і вироби самої різної форми, що і зумовило їх детальний опис.

Основні види АВП залежать від виду використовуваного АВН: премікси і волокніти, препреги, які із заздалегідь доданими фарбниками або іншими компонентами можуть зберігатися до їх подальшої переробки в композити практично необмежений час.

АВП з термореактивними матрицями виготовляють на основі олігомерів термореактивних смол, не повністю затверділих і тому текучих при нагріванні (фенолоформальдегідних, поліефірних, епоксидних й ін.) з додаванням порошкоподібних наповнювачів, фарбників, змащуючих речовин (для виключення прилипання до прес-форм).

1.3. Типовий технологічний цикл одержання орієнтованих волокнистих композиційних матеріалів

Приготування епоксидної (просочувальної або заливочної) композиції (ЕЗ) власне включає змішування ЕО, модифікованої відповідними добавками для додання композиції певних фізичних або механічних властивостей, поєднання ЕО з тверднучою системою і гомогенізацію одержаної композиції, яка надалі використовується для поєднання з армуючими наповнювачами.

У свою чергу, підготовка армуючого наповнювача, як правило, включає різні види енергетичної (наприклад, сушку) і хімічної обробки його поверхні для поліпшення поєднання зі зв'язуючим. Структура і форма використовуваного армуючого наповнювача багато в чому визначають вибір методу виготовлення заготовки виробу.

Особливістю виготовлення виробів із багатокомпонентних полімерних матеріалів полягає в тому, що матеріал і виріб у більшості випадків виготовляються з початкових компонентів одночасно. Для створення виробів з необхідними експлуатаційними властивостями вибрані методи і режими переробки повинні забезпечувати необхідну монолітність матеріалу, необхідний вміст, орієнтацію і рівнонапруженість армуючого наповнювача.

Основні параметри процесів одержання епоксидних композитів – це *тиск, температура і час*. Тиск забезпечує ущільнення матеріалу і створення виробів заданої форми. Температурно-часові режими одержання деталей і виробів визначаються протіканням в композитному матеріалі фізичних (релаксація) і хімічних (твердіння і зшивання) процесів. Крім того, тривалість

технологічного процесу залежить від швидкості прогрівання або охолодження матеріалу, який переробляється, що визначає вирівнювання температури по його товщині.

Одержання заготовки виробу з полімерних матеріалів, армованих безперервними ВН (головним чином нитками, джгутами, ровінгами, стрічками, тканинами, трикотажними матеріалами), здійснюють методами пошарового викладення, намотування, методом плетіння або ткацтва, а також комбінованим методом.

1.4. Методи модифікації рідких епоксидних композицій

Основна тенденція промисловості ПКМ в даний час полягає не стільки в розробці нових полімерів, скільки в модифікації відомих матеріалів, що використовуються для їх виготовлення [10]. Модифікація полягає в цілеспрямованому регулюванні структури і пов'язаних з нею властивостей полімеру на різних рівнях технологічного процесу, що і знайшло віддзеркалення в даному посібнику.

Метою модифікації є поліпшення технологічних і експлуатаційних характеристик епоксидних композитних матеріалів: підвищення життєздатності, зниження в'язкості, поліпшення деформаційно-міцнісних властивостей, тепло-, біо- і хімічної стійкості, підвищення діелектричних властивостей, зниження горючості, вдосконалення економічних показників (скорочення витрати ЕО, зменшення їх вартості, утилізація відходів виробництва).

Існуючі методи модифікації розподіляються на три основні групи: хімічні, фізико-хімічні і фізичні. Використовується і комбінація цих методів, які окремо описуються нижче.

1.4.1. Хімічна модифікація

Хімічна модифікація проводиться шляхом зміни хімічної будови олігомера, варіюванням типа твердника, введенням в систему реакційноздатних добавок, вступаючих у хімічну реакцію з молекулярною сіткою.

Методи хімічної модифікації можна класифікувати таким чином [2, 41]:

1) модифікація, заснована на хімічному перетворенні вже синтезованих макромолекул;

2) модифікація на стадії синтезу полімеру.

Хімічна модифікація полімерів здійснюється шляхом уведення до складу макромолекул невеликих фрагментів іншої природи. Зміна хімічної природи олігомерів і твердників дозволяє збільшувати довжину молекулярного ланцюга олігомера і твердника, варіювати будову міжвузлових ділянок затверділої системи, модифікувати кінцеві групи макромолекул олігомера, змінюючи тим самим макроскопічні властивості ЕП.

Уведення реакційноздатних добавок, здатних вступати в хімічну реакцію з полімером, дозволяє в широкому діапазоні регулювати фізико-механичні властивості ЕП, теплостійкість, стійкість до старіння й ін.

1.4.2. Фізико-хімічна модифікація

Найширше застосовуються фізико-хімічні методи модифікації структури епоксидних полімерів шляхом регулювання складу епоксидних композитів (введенням твердих нерозчинних наповнювачів, інертних пластифікаторів, розчинників, стабілізаторів, легуючих добавок, ПАР й інших модифікаторів), внаслідок чого можливе одержання матеріалів із заданим комплексом експлуатаційних властивостей [2, 41].

Особливо слід відзначити наповнення, оскільки воно є найбільш широко вживаним і високоефективним методом направленою регулювання властивостей ЕП, що дозволяє підвищити показники механічної міцності і жорсткості, хімічній стійкості, теплостійкості, діелектричних властивостей і т.д.

У загальному випадку під наповненням полімерів розуміють поєднання полімерів з твердими і/або газоподібними речовинами, які відносно рівномірно розподіляються в об'ємі композиції і мають чітко виражену межу розділу з безперервною полімерною фазою (матрицею).

По своїй дії наповнювачі розподіляють на активні, які утворюють міцні негідролізуємі хімічні зв'язки з ЕП, що приводить до підвищення експлуатаційних властивостей матеріалу, і неактивні (інертні), використовувані переважно для скорочення витрат зв'язуючого.

Для одержання наповнених полімерних композицій в більшості випадків застосовують тверді тонкодисперсні наповнювачі з частками сферичної (скляні мікросфери, золи-уносу), зернистої (сажа, кремнезем, деревна мука, крейда, каолін), пластинчастої (тальк, графіт, слюда), голчастої форми (оксиди, солі, силікати), а також ВН (бавовна, скло,- органо,- вуглецеволокно, азбест, целюлоза).

Малонаповнені (ступінь наповнення $v = 0 - 0,3$) композити володіють високими значеннями деформативності і ударної в'язкості, але низькою статичною міцністю, тоді як високонаповнені ($v = 0,3 - 0,7$) конструкційні композиційні матеріали володіють високими показниками жорсткості і міцності при стисненні по відношенню до ненаповненого полімеру.

Проте такі композити відрізняються високою крихкістю і малою граничною деформацією руйнування [2, 41].

1.4.3. Фізична модифікація

Разом з вищеописаними методами широко застосовуються фізичні методи модифікації ЕП. До них відносяться: термічна обробка, модифікація променевими методами, модифікація вакуумно-компресорною обробкою,

періодичною деформацією, обробка полімерів в електричних і магнітних полях [1, 2].

Фізичну модифікацію можна здійснювати на різних стадіях одержання, переробки і застосування полімерів: при синтезі, на стадії переробки полімеру у виріб, при обробці готового матеріалу до або під час його використання в певних умовах. Часто фізичну модифікацію застосовують спільно з хімічними або фізико-хімічними методами модифікації полімерів.

Одним з ефективних методів підвищення експлуатаційних властивостей епоксидних матеріалів є термообробка. Термообробка істотно впливає на молекулярну рухливість, структурну впорядкованість, швидкість і глибину твердіння, що спричиняє поліпшення фізичних властивостей епоксидних матеріалів.

Особлива увага приділяється вибору режимів твердіння ЕК. Основними параметрами при цьому є температура і тривалість твердіння, а також швидкість нагрівання і охолодження. Вибір температури твердіння залежить від типу ЕО і вживаного твердника. Епоксидні матеріали, затверділі при підвищених температурах, відрізняються підвищеною міцністю і жорсткістю, що пояснюється зміною надмолекулярної структури ЕО [1, 2].

Температура твердіння здійснює істотний вплив на вид і розмір надмолекулярних утворень у полімері. Так, з підвищенням температури унаслідок інтенсифікації теплового руху молекул зменшуються розміри асоціатів і час їх життя, що позначається на зменшенні розміру глобул ЕП. У свою чергу, від розміру глобул залежить густина сітки, а, отже, і параметри пружних властивостей полімерів.

Полімери з дрібноглобулярною структурою відрізняються більшою міцністю, оскільки зменшення розміру глобул підвищує вірогідність хімічної і фізичної взаємодії молекул за рахунок функціональних груп, розташованих на поверхні [2]. Збільшення глибини твердіння приводить до зсуву температури силювання полімерів в ділянку вищих температур. При цьому істотно знижується час твердіння, що може значно прискорити одержання епоксидних матеріалів.

Також можлива температурна обробка вже затверділих полімерів. При цьому відбувається зменшення числа функціональних груп ЕО і твердника, що не прореагували, унаслідок дозатвердіння полімеру, збільшується глибина твердіння, що приводить до підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних матеріалів [1, 2, 41].

Значний вплив на структуру і властивості епоксидних матеріалів здійснює їх модифікація періодичною деформацією. До цього методу модифікації відносяться УЗ- і вібраційна обробка. УЗ-дія розглядається як один з шляхів вдосконалення технології полімерних матеріалів, особливо на стадії поєднання складових композиту і формування його структури. Під дією УЗ змінюються умови гомогенізації суміші, її в'язкість, час релаксації і кінетика твердіння ЕК.

Ефективна УЗ-обробка дозволяє підвищити деформаційно-міцнісні і адгезійні характеристики затверділих матеріалів, знизити рівень залишкових

напружень, збільшити довговічність, до того ж значно скоротити час твердіння [1, 2, 41]. Цими чинниками і обумовлений вибір УЗ як домінуючого методу фізичної модифікації волокнистих епоксидних полімерів на основних стадіях їх одержання.

Ефективним методом підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів є також віброобробка, тобто низькочастотна обробка. Під дією низькочастотних коливань різко знижується в'язкість композицій, поліпшуються умови їх гомогенізації і переробки. Вібраційна дія на олігомер перед його твердінням приводить до отримання менш дефектної і більш впорядкованої структури, що сприяє зростанню міцності полімерів.

Достатньо широко використовується обробка полімерів в магнітному полі. Під дією магнітного поля знижується в'язкість полімерної суміші, підвищується її однорідність. В результаті утворення більш впорядкованої структури затверділих композицій підвищується їх міцність, а також ряд інших експлуатаційних характеристик.

Аналогічні результати дає радіаційне твердіння ЕП [2]. Успішно застосовуються методи модифікації низькотемпературною і електротермічною обробкою, ультрафіолетовим і інфрачервоним випромінюванням тощо.

На практиці для надання матеріалам ряду спеціальних властивостей часто використовується комбінація декількох методів фізичної модифікації одночасно з іншими методами модифікації.

1.5. Аналіз ефективності ультразвукової модифікації рідких реактопластичних композицій

Для здійснення ефективного (оптимального) режиму УЗ-обробки рідини необхідно насамперед обирати ефективні (оптимальні) значення інтенсивності I і частоти f УЗК. Так як більшість УЗ-рідких технологічних процесів пов'язано з УЗ-кавітацією і звукокапілярним ефектом [18–20, 52], то змінюючи умови протікання кавітації, можна підсилювати або послаблювати різні кавітаційні ефекти.

Успішне використання потужного УЗ для фізико-хімічних процесів пов'язане насамперед з рідким станом реагентів [3 – 7]. Практичне використання пружних коливань звукового й УЗ-діапазонів частот пов'язане насамперед з фізичними властивостями рідкого середовища, у якому вони поширюються, і тими явищами, які виникають при поширенні цих коливань [7].

Фізико-хімічна дія пружних УЗК в рідині, як правило, виявляється в полях середньої і великої інтенсивності УЗ, коли істотними стають такі ефекти, як УЗ-кавітація, радіаційний тиск і звуковий вітер. При цьому майже всі фізико-хімічні явища, що відбуваються в рідині при проходженні через неї потужних пружних УЗК, в тій або іншій мірі пов'язані саме з явищем *кавітації*.

Останнє обумовлене головним чином з тим, що рідини, легко "переносячи" дуже великі всебічні стиски, є надзвичайно чутливими до розтяжних зусиль. Тому при проходженні фази хвилі, яка створює розрідження в рідкому середовищі, утворюється дуже велика кількість розривів у вигляді

дрібних пухирців, що з'являються звичайно в тих місцях, де міцність рідини послаблена.

Як правило, такими місцями є маленькі пухирці газу, частки сторонніх домішок й ін. Ці маленькі порожнини (*кавітаційні пухирці*), які здійснюють пульсуючі коливання, приводять до появи навколо цих порожнин сильних мікротечій і локальної турбулізації середовища.

Після короткочасного існування кавітаційні пухирці лопаються під час фази стиснення у хвилі, розвиваючи при цьому великі локальні миттєві тиски, що досягають сотень атмосфер [3 – 7]. Виникаючі при лопанні кавітаційних пухирців ударні хвилі призводять до механічних руйнувань поверхні твердого тіла, що в ряді випадків використовується для промислових цілей.

Крім того, при лопанні кавітаційних пухирців спостерігається різке підвищення температури й виникнення електричних розрядів. Це приводить до активації рідини за рахунок появи в ній електричних зарядів, багатих на енергію дисоційованих та іонізованих молекул, а також атомів і вільних радикалів [18].

При цьому необхідна для виникнення кавітації інтенсивність I УЗ залежить від частоти коливань f і властивостей озвучуваної рідини. Тому при застосуванні потужних випромінювачів УЗ, що використовуються в різних технологічних процесах, необхідно контролювати рівень інтенсивності I таким чином, щоби не відбувалося в озвучуваному середовищі таких небажаних змін, як механодеструкція, хімічні реакції і т.п. Крім того, рівень інтенсивності I й частоти коливань f повинні відповідати санітарним нормам і вимогам конкретної технології [6, 18].

Що стосується власне фізичної модифікації у вигляді УЗ-обробки полімерних рідких середовищ, то слід зазначити, що вона отримала розвиток тільки наприкінці 20 сторіччя. Дія вібрації і УЗК [42 – 43], поряд з дією електричних і магнітних полів на полімери, може розглядатись як один із ефективних шляхів фізичної модифікації полімерів, якщо ця дія приводить до позитивних практичних наслідків.

Слід зазначити, що найбільше поширення в УЗ-технології об'ємної обробки рідких середовищ (у досліджуваному випадку ЕО і зв'язуючих на їх основі) отримали два варіанти озвучування (див. рис. 1.1–1.2) у технологічній ємності (просочувальній ванні) [6, 18].

Відповідно до першого варіанту (див. рис. 1.1, а), до дна просочувальної ванни через рухливу мембрану кріпиться магнітострикційний перетворювач – ПМС (або пакет п'єзокерамічних перетворювачів) 3. Із вмиканням УЗ-генератора (УЗГ) 1 проводиться об'ємне озвучування робочого середовища 4. Частоту УЗК контролюють частотоміром 2, а як теплоносії використовують воду.

Відповідно до другого варіанту (див. рис. 1.1, б), об'ємне озвучування робочого середовища 3 проводиться за допомогою концентратора 2 поздовжніх УЗК, що сполучений безпосередньо з магнітостриктором (або п'єзокерамічним перетворювачем), який живить генератор 2.

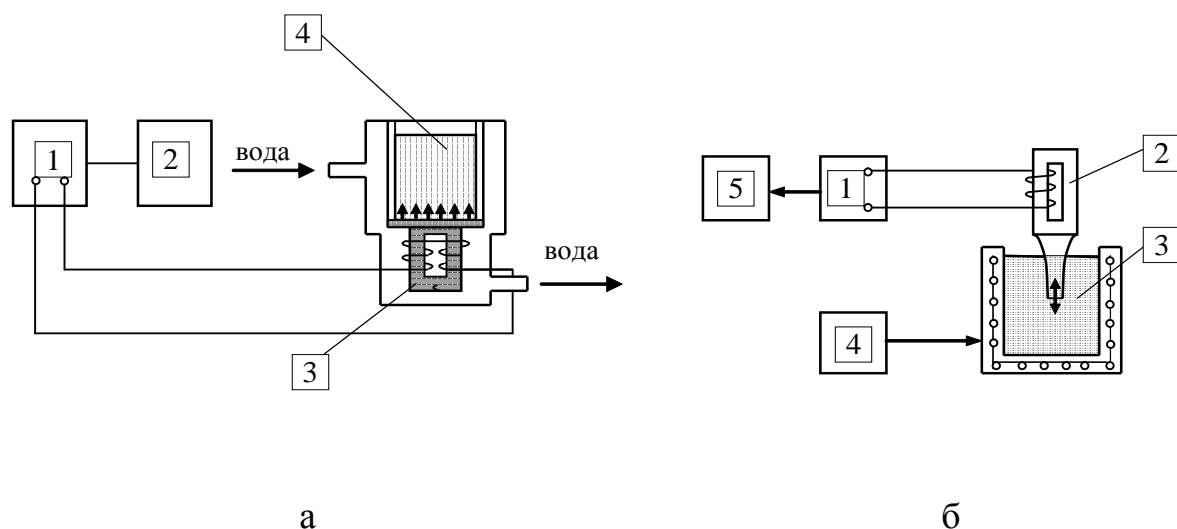


Рис. 1.1. Варіанти озвучування рідких композицій:
а – перший варіант; б – другий варіант

Частоту УЗК контролюють частотоміром 5, а амплітуду – візуально за допомогою мікроскопу 4. Як теплоносій також використовують воду (на рис. 1.1, б не показано).

Обидва варіанти озвучування мають як свої переваги, так і недоліки. Так, використання концентратора у другому варіанті дає можливість у порівнянні з першим варіантом озвучування збільшити амплітуду УЗК A (а, отже, і інтенсивність I) у декілька разів, тобто більш активно проводити УЗ-модифікування.

Проте при цьому варіанті озвучування ефективний об'єм полімерної рідини, що озвучується, в силу конструктивних особливостей концентратора і характеру процесу озвучування суттєво зменшується (наприклад, через малість випромінюючої поверхні УЗ-концентратора і значної в'язкості рідких полімерних середовищ, що озвучуються).

У той же час перший варіант озвучування дає можливість збільшити масу наважки полімерної рідини (ЕО), що важливо з точки зору підвищення продуктивності процесу об'ємного озвучування. Одночасно цей варіант характеризується меншими значеннями параметрів УЗ-обробки (зокрема, амплітуди A) у порівнянні із другим варіантом.

Це, в кінцевому підсумку, не дозволяє реалізувати весь потенціал зміцнення затверділих полімерних композицій, який можна отримати при обробці за другим варіантом озвучування. При цьому оптимальні інтервали параметрів УЗ-обробки для кожного варіанту озвучування і марки ЕО (або зв'язуючого на його основі) визначають експериментально-статистичним шляхом.

Таким чином, використання фізичної модифікації у вигляді об'ємного УЗ-впливу, поряд із хімічною модифікацією, відкриває нові можливості для

спрямованого регулювання структури і властивостей ЕК. Так, наприклад, відомий спосіб модифікації ЕК під дією магнітного поля [28]. Однак цей спосіб не забезпечує достатньо високих фізико-механічних властивостей і структурної однорідності затверділих ЕК.

Значна ефективність УЗ-обробки рідких епоксидних зв'язуючих, яка змінює не тільки технологічні характеристики зв'язуючих, але й фізичні властивості одержуваних після їх затвердіння сітчастих полімерів, встановлена в результаті ряду досліджень. Так, зокрема, встановлено, що в результаті вібрації відбувається зниження динамічної в'язкості, а також модуля пружності розплавів полімерів [43].

Використання низькочастотної вібрації (6 – 100 Гц) дозволяє знизити в'язкість полімерних систем у десятки разів, але після зняття вібрації в'язкість олігомеру зростає до значення, яке перевершує початкове значення.

Чередування вібрації і "відпочинку" призводить до ступінчастого збільшення в'язкості ЕО на 30 – 40%. Проте віброакустична дія в діапазоні частот від 3 кГц до 10 кГц протягом 60 хвилин на ЕО марок ЕД-20 і ЕД-8 також знижує їх в'язкість. Екстремальна залежність в'язкості ЕО марки ЕД-20 у залежності від часу віброобробки τ на середніх УЗ-частотах встановлена в роботі [36], а ефективний час УЗ-дії становив 30 хв.

Дію УЗ на ЕО у суміші з пластифікаторами і наповнювачами було попередньо досліджено в роботі [129]. При цьому залежності в'язкості η , крайового кута змочування θ твердих підложок і інтенсивності віброобробки I як на низьких (100 Гц), середніх (1 кГц), так і на високих (18 кГц) частотах вказаних композицій описувались екстремальними кривими.

Використання УЗ-дії на мікрочастинки-наповнювачі в процесі трансверсального армування полімерних композитів дозволяє значно інтенсифікувати процес армування зв'язуючого при ефективному значенні амплітуди коливань 10 – 15 мкм та зміцнювати затверділе зв'язуюче.

Розкид значень (коефіцієнт варіації) міцності оброблених за допомогою УЗ і затверділих ЕК при стисненні може зменшуватись на 40%, ударної в'язкості – на 80%, твердості – на 20%, а для опору зсуву – в 1,5 – 2 рази у залежності від умов обробки [132].

Використання УЗ для обробки ЕК скорочує також час їх твердіння у 2–4 рази, що створює передумови направленої оптимізації технологічних параметрів виготовлення виробів, і в кінцевому результаті дозволяє підвищити продуктивність праці та отримати суттєву економію енергоресурсів.

Аналіз робіт [129, 132] показує, що при вібраційній обробці на частоті 100 Гц відбувається помітний ефект структурної перебудови у досить вузькому часовому інтервалі. Це є небажаним, так як може негативно позначитись на властивостях кінцевого продукту – полімеру.

При обробці на частоті 1 кГц часовий інтервал, в якому здійснюється структурна перебудова, збільшується несуттєво. Очікується, що при збільшенні частот УЗ-обробки шуканий часовий інтервал може досягти прийнятних для технологічних цілей значень. Проте цей частотний інтервал необхідно встановлювати експериментально.

Відомий також спосіб модифікації ЕК шляхом їх УЗ-обробки (акустичної кавітації) [41]. УЗ-обробка різних композицій за цим способом проводилася на невзаємопов'язаних параметрах обробки: фіксованих частотах (20 кГц; 21 кГц; 29 кГц), амплітуді (8 мкм), інтенсивності (0 – 3 Вт/см²; 2 – 7 Вт/см²), часі (0 – 40 хв.; 60 – 120 хв.), температурі (100 °С і 120 °С).

Досягнуте зміцнення щодо розтягання гранично затверділих полімерних композицій за цим способом склало 11 – 20%. Однак цей спосіб не забезпечує достатньо високих значень як технологічних властивостей олігомерів, так і фізико-механічних властивостей затверділих полімерів на їх основі. До недоліків цього способу слід віднести як достатньо великий час обробки (60–120 хв), так і суттєве зростання в'язкості олігомерів після закінчення обробки.

Ще один відомий спосіб отримання зв'язуючого для композиційних матеріалів передбачає змішування епоксидної основи ЕД-20 із твердником діетилентріаміном – ДЕТА з наступною УЗ-дією, яка здійснюється за допомогою концентратора поздовжніх УЗК (другий варіант озвучування) при частоті 17 – 44 кГц, амплітуді 50 – 120 мкм, інтенсивності 15 – 30 Вт/см² і температурі 70 – 90°С протягом 30 – 45 хв. .

Але цей спосіб не містить механізму обґрунтування направлено застосування УЗ-модифікації та вибору ефективних параметрів озвучування.

Аналіз особливостей здійснення фізичної (а саме УЗ) модифікації рідких середовищ [133], зокрема, рідких ЕК, що застосовуються при формуванні багатокомпонентних ПКМ, свідчить про перспективність здійснення УЗ-модифікації ЕО як у низькочастотному, так і у середньочастотному УЗ-діапазонах.

Крім того, використання надлишкового тиску при здійсненні УЗ-обробки рідких полімерних середовищ є важливим чинником збільшення інтенсивності і скорочення часу УЗ-обробки. Так, аналіз монографії [20] показує доцільність використання надлишкового тиску при здійсненні УЗ-обробки рідких середовищ, зокрема, води. Адже при цьому зростає інтенсивність і водночас скорочується час УЗ-обробки.

Тому з цієї точки зору є доцільним дослідження ефективних параметрів УЗ-модифікації ЕО як за нормального, так і в присутності надлишкового тисків.

Було досліджено вплив УЗ на процес твердіння, структуру і властивості полімеркомпозитних покриттів ЕО у вигляді ЕД-20 і ЕД-16. Методом ІЧ-спектроскопії встановлено, що УЗ-обробка цих композицій приводить до підвищення швидкості і повноти процесу зшивання, а також сприяє скороченню часу їх термообробки на 20 – 30% у порівнянні з необробленими системами.

Прискорення процесу твердіння пояснюється авторами більш інтенсивним змішуванням компонентів і рівномірним розподілом твердника в об'ємі матеріалу.

Аналіз деяких ефективних способів одержання препрегів (просочених напівфабрикатів) на базі ЕК з застосуванням УЗ-модифікації свідчить про те, що для кожного складу ЕК і ПКМ на їх основі ефективні параметри УЗ-

модифікації потрібно встановлювати, як правило, експериментально.

Проте в науково-технічній літературі недостатньо досліджено вплив режимів УЗ-модифікації в різночастотних (низькочастотному і середньочастотному) діапазонах за нормального і надлишкового тисків на технологічні характеристики ЕО, зв'язуючих та експлуатаційні характеристики отримуваних ЕП на їх основі.

Аналіз вищенаведених робіт дозволяє припустити, що така дія в залежності від ефективних параметрів УЗ-обробки ЕК може привести до покращення експлуатаційних властивостей кінцевих ПКМ на їх основі.

У свою чергу, встановлення оптимальних (ефективних) режимних параметрів УЗ-модифікації на базі застосування методів експериментально-статистичного моделювання є одним із основних чинників при розробці наукових основ направленої застосування УЗ-модифікації при формуванні виробів із термопластичних і реактопластичних ПКМ, спрямованих на підвищення ефективності їх формування.

Усі вищезазначені результати слугували базою для проведення подальших досліджень ефективності об'ємної УЗ-модифікації рідких ЕО і ЕК для здійснення направленої прогнозування ефективних параметрів фізичної модифікації на базі відповідного обладнання, що відображено у наступних розділах.

2. АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ РЕАКТОПЛАСТИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНО-ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ НА БАЗІ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У розділі 2 подано аналіз перспективності конструкторсько-технологічного проектування технічних засобів для одержання реактопластичних КВМ на базі структурно-параметричного геометричного моделювання. Наведений типовий технологічний цикл одержання виробів з КВМ з точки зору ефективності геометричного моделювання його базових процесів та обладнання. Розглянута перспективність застосування УЗ для процесів приготування ПЗ та його дозованого нанесення, а також проаналізовані ефективні засоби УЗ-кавітаційної обробки з випромінюючою пластиною [19 – 27].

2.1. Особливості проектування технології і устаткування для виробництва реактопластичних КВМ

Складність вирішення задачі автоматизованого проектування технології та устаткування для виробництва реактопластичних КВМ обумовлена необхідністю дослідження комплексу питань, спрямованих на виявлення і вивчення взаємозв'язків між структурно-механічними та геометричними параметрами виробів, з одного боку, та технологічними факторами їх виробництва, з іншого боку.

При цьому, незважаючи на широке використання досягнень і методів фізики, теоретичної механіки та опору матеріалів, чітко вимальовується головний предмет теорії, не властивий жодній із цих наук, але властивий тільки технології виготовлення виробів із реактопластичних КВМ [1, 27].

Предметом дослідження технології виготовлення виробів із КВМ є (математичні) закономірності, що встановлюють не тільки взаємозв'язки, але й взаємовплив технологічних факторів, які обумовлюють у тих чи інших наперед заданих виробничих умовах отримання необхідних експлуатаційних характеристик виготовлених виробів в межах розрахункових відхилень.

Наявність власного вищезазначеного предмета досліджень, причинна обумовленість взаємозв'язків різнохарактерних процесів й операцій, спрямованих на одержання виробів заданої якості, причому з мінімальними трудовими витратами (для даних умов і часу), математична теорія, яка відображає внутрішні технологічні закономірності – все це свідчить про те, що ці питання становлять єдиний комплекс теоретичного базису геометричного та комп'ютерного моделювання (проектування) технології (конструктивно-технологічних параметрів) виготовлення виробів із реактопластичних КВМ.

Для мінімізації матеріальних і часових витрат слід використовувати ефективні методики моделювання конструкційно-технологічних параметрів технології й устаткування (інструментів) для одержання реактопластичних КВМ з урахуванням специфіки модельованих об'єктів, зокрема, шляхом

адаптації методології СПГМ, що останнім часом набирає поширення, до вирішення конкретних завдань [9].

2.2. Типовий технологічний цикл одержання намотувальних виробів з реактопластичних КВМ

Відомо [4, 5], що УЗ-технологічне обладнання характеризується певними корисними можливостями та характеристиками, а також застосуванням у різноманітних галузях промисловості. Різноманітні матеріали на основі КВМ широко використовуються, зокрема, в силових елементах і конструкціях, застосовуваних у хімічній, машинобудівній, авіаційній, ракетно-космічній, будівельній і нафтогазовій промисловості тощо [1, 2].

Тому вибір та обґрунтування ефективних режимних параметрів процесів виробництва КВМ, а також конструкторсько-технологічних параметрів застосовуваного при цьому технологічного обладнання та інструменту мають принципове значення [1, 19–27]. У свою чергу, оптимізація ефективних режимних конструктивно-технологічних параметрів процесів, інструменту та обладнання для виробництва КВМ базується на структурному аналізі типового циклу їх формування.

Останній, як правило, складається з наступних основних стадій (базових технологічних процесів) [1, 27]: 1) приготування полімерної (епоксидної) композиції (ЕК) із складових компонентів та її модифікація наповнювачами, твердниками, розбавлювачами, пластифікаторами тощо (процес приготування вихідної ЕК); 2) підготовка армуючого ВН; 3) поєднання ЕК з армуючим ВН і забезпечення певного вагового (процентного) співвідношення ЕК у структурі просоченого ВН за допомогою формоутворювального та формуючого оснащення і устаткування (відповідно процеси просочування та дозованого нанесення) та подальше «мокре» намотування просоченого ОВН; 4) сушка просоченого армуючого ВН (процес сушки); 5) збирання заготовки; фіксація матеріалу або виробу заданої форми і розмірів з подальшим твердінням зв'язуючого; механічна обробка виробу (процеси збирання, твердіння й формування).

Загалом у даній навчальному посібнику під базовими розуміють процеси, що складають основу будь-якого (типового) технологічного циклу виробництва досліджуваних виробів з КВМ [1]. До них, насамперед, відносять процес обробки просочувального рідкого ПЗ, процеси: «вільного» просочування ОВН рідким ПЗ, дозованого нанесення ПЗ на попередньо просочений ОВН, а також безперервного «мокрого» намотування за заданим законом просоченого ОВН (волокон, тканин або джгутів) на оправку.

Базовий процес приготування ЕК (просочувальної або заливочної) чи ЕЗ на її основі власне включає змішування ЕС, модифікованої відповідними добавками для надання композиції певних фізичних або механічних властивостей, поєднання ЕС із тверднучою системою та гомогенізацію одержаної композиції [1, 2].

Проміжною стадією одержання КВМ у типовому технологічному циклі є процес «вільного» просочування (орієнтованих) ВН (рис. 2.1), у якому

орієнтований ВН (тканина, ровінг, джгут) 5 з рулону ведучим валом 3 подається з заданою швидкістю в просочувальну ванну 6, куди безперервно або періодично поступає ЕЗ, що містить суміш ЕК та розчинника (спирту, ацетону й ін.) для зниження в'язкості просочувальної композиції.

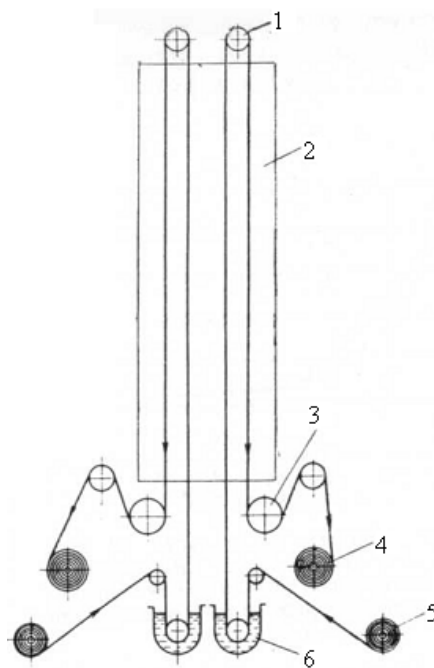


Рис. 2.1. Принципова схема базового процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ЕЗ [1]:

- 1 – перевалочний вал;
- 2 – сушильна частина просочувально-сушильної машини;
- 3 – ведучий вал;
- 4 – приймальний механізм (бобіна);
- 5 – орієнтований (армуючий) ВН (тканина, ровінг, джгут);
- 6 – просочувальна ванна

Забезпечення певного вмісту (дозування) ПЗ у ВН, що просочився (як правило, це значення становить 35–40% [31]), є не менш важливим, ніж рівномірний його розподіл по перерізу і довжині ВН. Тому доцільним є розгляд інтенсифікуючих методів одержання КВМ, зокрема, за допомогою УЗ [27].

Виходячи з ванни 6, армуючий ВН 5 з шаром ЕЗ піднімається вгору в сушильну частину 2 просочувально-сушильної машини. Обігнувши верхній перевалочний вал 1, армуючий ВН 5 знов повертається в сушильну частину 2 просочувально-сушильної машини, і потім через ведучий вал 3 подається на приймальний механізм (бобіну) 4, де готовий ВН згортається в щільний рулон.

Надалі в навчальному посібнику досліджуються в основному такі вищезазначені стадії типового технологічного циклу одержання виробів із

КВМ, армованих ВН, з точки зору геометричного та комп'ютерного моделювання: базові процеси приготування ЕК, «вільного» просочування та дозованого нанесення.

2.2.1. Передумови до геометричного моделювання базового процесу «вільного» просочування

Під просочуванням капілярно-пористих матеріалів у загальному випадку розуміють заміщення повітря, що знаходиться в порах і капілярах пористого матеріалу, просочувальним складом [28 – 30]. Просочування здійснюють для надання просоченим і надалі висушеним композитним матеріалам певних властивостей (міцності, волого- і вогнестійкості, пружності, забарвлення і т.п.).

Під час просочування дуже важливо забезпечити максимальне витіснення повітря і заміну його зв'язуючим, оскільки повітряні включення в волокнистому наповнювачі, що утворюються при швидкому його зануренні в полімерний розчин, перешкоджають якісному та повному просочуванню ВН, гомогенізації кінцевого продукту і його зміцненню.

Використовувані для виготовлення джгутів або склотканин нитки, з яких сформовано ОВН, складаються з численних елементарних мікрОВОЛОКОН діаметром 3–100 мкм (лінійною щільністю до 0,1 текс), а їх кількість у нитці становить 1000 або більше. Причому в структурі нитки більш ніж 25% від її об'єму становлять мікропори, в яких знаходиться защемлене повітря, яке при «вільному» просочуванні необхідно витіснити [1].

Оскільки «вільне» просочування наповнювача розчином зв'язуючого можна розглядати як витіснення повітря з пор і капілярів ВН і заміну його зв'язуючим, цей процес можна класифікувати як один із прикладів капілярних явищ.

Відомо, що класичні задачі просочування капілярно-пористих тіл зводяться до знаходження ефективного (еквівалентного) капілярного радіуса циліндричного капіляра та знаходження його структурних характеристик (пористості, внутрішньої поверхні) [28]. Окрім того, внаслідок стохастичного розміщення мікрОВОЛОКОН у реальній структурі просочуваного ОВН за певного зусилля натягнення при просочуванні і намотуванні [15] є доцільним застосування функції розподілу пор за розмірами для коректного знаходження еквівалентного капілярного радіусу [28].

Отримати шукану функцію розподілу пор за розмірами в принципі можливо чисто експериментальним шляхом, наприклад, методом ртутної порометрії [30] або рентгенівської комп'ютерної томографії. Однак такі підходи вимагають використання коштовного обладнання. Тому в роботі [31] був запропонований інший підхід, який полягає в попередній побудові віртуальної (комп'ютерної) моделі структури нитки і отриманні необхідних даних за результатами її дослідження. На думку автора [31], це дозволяє вивчити розподіл пор за розмірами на рівні мікрОВОЛОКОН і на цій основі розробити нові технічні рішення для вдосконалення процесу «вільного» просочення.

Завдання в [31] полягало в знаходженні міжцентрових відстаней контурів перетинів волокон (кіл) по вертикалі і горизонталі, що відповідають заданій

пористості структури нитки, якщо наперед відомий радіус волокна. При цьому передбачається, що пористість нитки може становити 50%, що досить далеко від реальності. Рішення поставленого в [31] завдання зводиться до багаторазового обчислення за відомою формулою величини пористості до отримання необхідної її величини при зміні міжцентрових відстаней між волокнами-колами.

Причому під пористістю автор [31] розуміє міжцентрову відстань між волокнами, що не є точним з геометричної (й фізичної) точки зору. Однак значні величини отриманих допустимих похибок (у т.ч. за величиною пористості) і суттєве відхилення модельної кривої розподілів від експериментальної кривої зумовлюють, на думку дисертанта, обмежене застосування розробленої методики (в основному для приблизної попередньої оцінки).

Безперервне «мокре» намотування просочених рідким ПЗ волокон здійснюється на оправку, яка, зазвичай, має конфігурацію внутрішньої поверхні майбутньої конструкції. При цьому просочені волокна укладаються з деяким натягом. Останній є одним з найбільш значущих технологічних чинників, що дозволяє істотно впливати на формування структурних та міцних показників затверділих КВМ. Адже натяг забезпечує «прямолінійність» волокон (й відповідно міжволоконних капілярних радіусів) та їх щільну укладку у структурі [1].

Залежно від типу армуючого матеріалу (ОВН), його геометрії, використовуваного полімерного зв'язуючого, а також габаритів виробу, що формується (т.зв. «масштабний ефект»), може змінюватися характер впливу зусилля натягу на структуру та властивості КВМ [1]. Таким чином, натяг при просочуванні і «мокрому» намотуванні – це фактор, який регулює початковий напружений стан двокомпонентної системи затверділого КВМ. Змінюючи зусилля натягу ОВН при просочуванні і «мокрому» намотуванні за певним автоматизованим алгоритмом, можна змінювати умови (кінетику) протікання вищезгаданих базових процесів формування КВМ.

Кінцевою метою геометричного моделювання базового процесу «вільного» просочування є його комп'ютерна (математична) модель, в якій можна аналізувати і коригувати схему укладки волокон у структурі ОВН, у тому числі в залежності від зусилля натягу ОВН при просочуванні, а також моделювати кінетичні параметри процесу «вільного» просочення в залежності від значення ефективного капілярного радіуса.

Проте відсутність адекватних підходів до коректного визначення розподілу волокон у мікроструктурі ОВН з урахуванням їх стохастичного характеру є основною проблемою при реалізації такої моделі. Тому не дивно, що формули для знаходження теоретичного еквівалентного капілярного радіуса були отримані переважно для регулярних (тканини), а не для стохастичних волокнистих структур [1], що є набагато складнішою задачею.

Також необхідно коротко проаналізувати ефективність застосування УЗ при формуванні реактопластичних КВМ, адже це обумовлює необхідність оптимізації конструктивно-технологічних параметрів відповідного УЗ-обладнання та інструменту на базі розроблених геометричних моделей.

2.3. Перспективність застосування УЗ для базових процесів приготування полімерного зв'язуючого, просочування та дозованого нанесення

Одним із найбільш перспективних засобів фізичного впливу на рідкі або тверді компоненти, які використовуються для інтенсифікації технологічних процесів, є застосування механічних коливань УЗ-діапазону, або УЗ-коливань (УЗК) [4–8, 17–18].

У роботах [129, 131 – 133, 137 – 139] було знайдено сукупність ефективних параметрів УЗ-дії та започатковано підходи до моделювання ефективних конструктивно-технологічних параметрів технічних засобів для одержання широкого спектру КВМ. Ці результати були взяті за основу при створенні відповідних геометричних моделей досліджуваних технічних засобів.

Зазначене вище обумовлює перспективність застосування УЗ для процесів приготування рідкого ПЗ та дозованого нанесення його на просочений ВН. Для останнього процесу доцільним є аналіз наявних ефективних технічних засобів кавітаційної обробки з випромінюючою пластиною, які генерують необхідні для конкретних технологічних процесів УЗК, а також розроблення на базі геометричного моделювання відповідних вдосконалених алгоритмів розрахунку конструктивно-технологічних параметрів цих технічних засобів.

2.4. Аналіз ефективних засобів ультразвукової кавітаційної обробки з випромінюючою пластиною

Конкретний технологічний процес (в даному випадку – процес дозованого нанесення ЕС на просочений тканий ВН) повністю визначає конструкцію пакету та геометрію випромінюючої системи, а також амплітуду й характер УЗК випромінюючої поверхні [4–8, 17–18].

Серед засобів кавітаційної обробки з плоскою випромінюючою пластиною найбільш масовими є пристрої у вигляді ванн з рідкими миючими середовищами з введеними в них УЗК. Останні створюються за допомогою магнітострикційних перетворювачів (ПМС) або п'єзокерамічних чи п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) пакетного типу.

Через малу амплітуду коливань перетворювачів пакетного виду, якої недостатньо для протікання ряду технологічних процесів, що вимагають великої концентрації енергії на певній площі (або в об'ємі), застосовують спеціальні концентратори енергії з різними типами хвилеводів [4 – 5].

У свою чергу, при автоматизованому проектуванні та експлуатації коливальної системи, яка складається з випромінюючої пластини з ПМС або електрострикційними вібраторами, необхідне виконання ряду умов, що забезпечують резонансний режим роботи цих коливальних систем [4 – 8]. Основні труднощі при проектуванні коливальних систем, які містять прямокутну випромінюючу пластину, полягають у тому, що розміри цих пластин, як правило, підбирають експериментально з урахуванням вищевикладених вимог [4–8, 16–18, 27].

Так, наприклад, великі розміри випромінюючої поверхні пластини призводять до того, що остання, у випадку кріплення однопакетного ПМС, зазнає вигинних коливань, чим обумовлює нерівномірність УЗ-поля вздовж і впоперек зовнішньої (робочої) поверхні випромінюючої пластини. В результаті цього можлива поява дефектних ділянок одержуваного кінцевого матеріалу.

Тому в даний час починають знаходити широке застосування перетворювачі, магніострикційні пакети яких розташовані на певній відстані один від одного і припаяні (чи приварені) до загальної пластини постійного перетину [4 – 5]. Однак складність виготовлення, труднощі кріплення магніострикційних пакетів до випромінюючої пластини та періодична їх заміна, а також низький к.к.д. і необхідність постійного водяного охолодження в процесі роботи ПМС, є основним недоліком таких ПМС [4 – 5, 43].

У свою чергу, ПЕП, використовувані в УЗ-установках поряд з ПМС, є, як правило, резонансними системами, що працюють на частотах основного резонансу або непарних гармонік [4 – 5, 43]. Застосовування під час роботи ПЕП повітряного охолодження не викликає ані додаткових втрат енергії, ані кавітаційного руйнування, як у випадку використання примусового водяного охолодження ПМС-пакетів [6, 43 – 44].

Існуюча нерівномірність поля згинального випромінювача може бути зменшена раціональним вибором типу випромінювача УЗ, геометричних розмірів випромінюючої пластини, а також вибором оптимальної геометричної форми й упорядкуванням розташування випромінювачів один щодо одного і щодо оброблюваного об'єкта (середовища).

З урахуванням вищевказаних факторів використовуються ті чи інші методи і пристрої УЗ-обробки. При цьому попередньо було встановлено, що використання контактного низькочастотного УЗ-впливу, наприклад, випромінюючою УЗ прямокутною пластиною, є ефективним методом стабілізації (дозування) вмісту полімерного зв'язуючого в просоченому тканому наповнювачі [16].

Так, відомий пристрій для просочування й дозованого нанесення зв'язуючого, який містить засоби для нанесення зв'язуючого, інструмент для просочування та дозування зв'язуючого у вигляді ПМС, що контактує з оброблюваним матеріалом прямокутною випромінюючою пластиною [45]. Таке виконання ПМС сприяє попередній обробці ПЗ, що скупчується перед краєм ребра пластини, а також більш глибокому проникненню ПЗ у пори матеріалу.

Також відомий метод дозованого нанесення зв'язуючого на довгомірний волокнистий матеріал шляхом двостороннього асинхронного контактного впливу випромінювачами УЗК 3,4 на поверхню матеріалу 1 із заздалегідь нанесеним на нього зв'язуючим 2 при симетричній подачі коливань з регулюванням їх інтенсивності і кута подачі γ_1 і γ_2 до поверхні цього матеріалу [46, 47] (див. рис. 2.2).

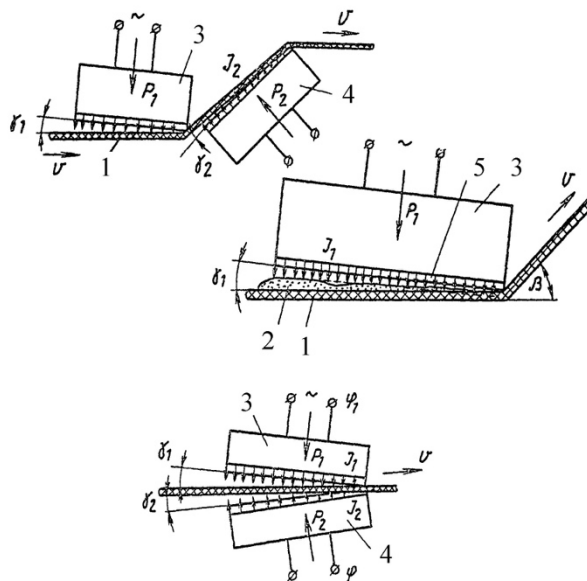


Рис.2.2. Пристрій для просочування та дозованого нанесення зв'язуючого на довгомірний волокнистий матеріал із застосуванням УЗ [46, 47]

Причому як випромінювачі УЗК 3,4 використовують ПМС з плоскою випромінюючою пластиною 5 (рис. 1.2). Зміна напрямку переміщення просоченого матеріалу 1 після контакту з ребром випромінюючої пластини 5 визначається кутом β . Просочений матеріал 1, що протягують зі швидкістю v , обробляють з обох сторін синхронними УЗК. Варіювання вмісту зв'язуючого в просоченому матеріалі 1 і видалення надлишків зв'язуючого здійснюють регулюванням інтенсивності I_1 та I_2 , зусиллями притиску P_1 і P_2 і кута подачі γ_1 і γ_2 УЗК до поверхні матеріалу 1.

Викладене вище зумовлює напрямки досліджень при геометричному моделюванні елементів таких коливальних систем на основі плоскої випромінюючої пластини, двоступінчастих хвильоводів-концентраторів і ПЕП для процесу дозованого нанесення ПЗ на просочений ВН та комп'ютерному моделюванні й візуалізації отримуваних співвідношень.

2.5. Доцільність застосування методології структурно-параметричного геометричного моделювання для оптимізації технологічних процесів та обладнання

Слід зазначити, що розв'язання задачі проектування конструкторсько-технологічних параметрів формування КВМ є дуже складною науково-технічною проблемою з ряду причин. Адже досі відсутні достатньо чіткі теоретичні уявлення, математичні залежності та відповідні алгоритми, що дозволяють із достатньою точністю прогнозувати режимні параметри, зокрема, для базових процесів виготовлення КВМ, серед яких приготування просочувальних складів, просочування, дозоване нанесення, в тому числі із застосуванням УЗ як найбільш ефективного інтенсифікуючого методу [7–8, 27].

Тому доцільним є створення науково обґрунтованої системи уявлень, яка охоплює конкретні питання, що відносяться до автоматизованого проектування досліджуваних процесів одержання КВМ, включаючи використане при цьому устаткування, із застосуванням сучасної методології автоматизованого проектного моделювання.

Проте, незважаючи на досягнутий прогрес у сфері автоматизованого проектування виробництва КВМ, у багатьох випадках проектні рішення, що приймають розробники у тій чи іншій ситуації, ґрунтуються на їх особистому досвіді та часто будуються переважно на евристичних засадах. Вирішення цієї проблеми у значній мірі можливе шляхом використання інформатизації виконуваних проектно-технологічних робіт.

У свою чергу, фундаментальну основу інформатизації становлять саме геометричні моделі тих чи інших процесів чи обладнання, які формуються за допомогою різноманітних комп'ютерних автоматизованих систем, що, в свою чергу, дозволяють здійснювати оптимізацію геометричних параметрів досліджуваних технічних об'єктів.

З цієї точки зору також є важливою геометрична оптимізація конструкційних параметрів застосовуваного технологічного обладнання, що широко використовується для інтенсифікації технологічних процесів [7, 17] та для одержання бездефектної структури затверділих КВМ, а саме у вигляді УЗ-хвилеводів-концентраторів та дозаторів.

Що стосується вищевказаного аспекту, то слід зазначити, що в останні роки почав активно розвиватися науковий напрямок, який включає методологію СПГМ (структурно-параметричного геометричного моделювання) із застосуванням засобів комп'ютерної техніки, що є важливим елементом прикладної геометрії та інженерної графіки [48 – 52]. СПГМ можна вважати ефективним методом сучасної прикладної геометрії. Адже методологія СПГМ дозволяє інтегровано реалізувати базові засади сучасного автоматизованого проектування технологічних процесів та обладнання [9], зокрема, для виготовлення намотувальних виробів з реактопластичних КВМ.

Використання цієї методології дозволяє при відносно невеликих часових витратах отримувати досить точні математичні залежності, які описують варіантні взаємозв'язки між параметрами й характеристиками проєктованих технічних об'єктів. Так, зокрема, застосування методології СПГМ поширюється на складні геометричні об'єкти, серед яких, наприклад, різні компоненти та обладнання (інструмент) для машинобудування, в тому числі хімічного та нафтогазового, технологічні процеси їх виготовлення і т.п.

У рамках методології СПГМ переважним є застосування *системного підходу*, який передбачає представлення будь-якого об'єкта або процесу його формоутворення як певної впорядкованої сукупності деяких окремих складових компонентів, які, у свою чергу, можуть включати й інші елементи.

При практичному використанні розглянутої методології широко застосовуються принципи комплексного підходу, варіантності, оптимальності, а також принцип відкритості та розвитку, який передбачає можливість легкого оновлення та розширення складових компонентів СПГМ [9].

Таким чином, можна стверджувати, що проведення комплексної оптимізації при виготовленні високоякісної технічної продукції з реактопластичних КВМ обумовлює доцільність проведення комплексних наукових досліджень щодо розроблення більш досконалих прийомів, методів та алгоритмів математичного відтворення досліджуваних технічних об'єктів та процесів.

Саме тому методи сучасної прикладної геометрії, що використовуються на практиці, і які дозволяють досліджувати вплив геометричної форми структурних елементів (ОВН) реактопластичних КВМ та поверхонь формуючого (УЗ-технологічного) обладнання на властивості затверділих композитів, набувають широкого застосування і є актуальними [141], у т.ч. з точки зору досягнення ресурсоенергоефективності як одного з оптимізаційних критеріїв.

2.5.1. Адаптація базових принципів структурно-параметричного геометричного моделювання до вирішення задач проектування технологічного інструменту

У загальному випадку, під *параметричною геометричною моделлю* розуміють деякий математичний опис певного геометричного об'єкта з використанням параметрів для його визначення, виділення потрібних фігур та керування формоутворенням досліджуваного виробу [9].

При цьому застосування параметричного моделювання поширюється також на більш складні, порівняно з окремими кривими та поверхнями, геометричні об'єкти, серед яких, наприклад, різноманітні деталі та інструмент для машинобудування, в тому числі хімічного, технологічні процеси їх виготовлення тощо.

Відповідно до застосовуваного системного підходу, досліджувану фігуру (або технологічний процес чи операцію формування) необхідно обов'язково розглядати в якості потенційної складової геометричної системи більш високого ієрархічного рівня, наприклад, системи, що трактує технологічний процес (формоутворення) в цілому.

Узагальненням методології параметричного формоутворення у прикладній геометрії та інженерній графіці є так зване *структурно-параметричне моделювання*, що цілком відповідає конкретній реалізації фундаментальних наукових прийомів теорії подібності, аналізу й синтезу, а також їх гармонійному поєднанню.

При цьому структурні компоненти створюваних структурно-параметричних моделей характеризують дискретні елементи з певними стійкими властивостями (наприклад, трикутники, що мають по три сторони тощо), а параметричні – можливість поступового та плавного переходу зазначених об'єктів від одного стану в інший (наприклад, шляхом відповідної зміни їх параметрів форми й положення у просторі) [9].

Загалом під *структурно-параметричною геометричною моделлю* (СПГМ) розуміють математичний опис досліджуваного геометричного об'єкта

або процесу формоутворення з використанням параметричного підходу для визначення його складових елементів (точок, кривих, поверхонь, об'ємних тіл тощо) та варіантних структурних зв'язків поміж ними із забезпеченням можливості виділення необхідних фігур і комплексного ефективного (оптимального) керування процесами формоутворення досліджуваного виробу, тобто елементами технології.

У свою чергу, під *структурно-параметричним геометричним моделюванням* розуміють сукупність використовуваних прийомів побудови, дослідження та використання об'єктів і процесів, що відтворені за допомогою методології СПГМ.

Виділяють наступні базові принципи математичної реалізації структурно-параметричної методології [9, 48–52]:

принцип системного підходу, що передбачає аналіз досліджуваного об'єкта одночасно і як множини певних взаємопов'язаних між собою елементів, і як потенційного компонента геометричної фігури більш високого, ніж окремі елементи, ієрархічного рівня;

принцип комплексного підходу, який полягає у пристосуванні геометричної моделі до узгодженого урахування різноманітних потреб інших математичних описів досліджуваного об'єкта (виробу або процесу);

принцип варіантності, що полягає у можливості забезпечення геометричною моделлю гнучкого, ефективного, прогнозованого та зручного для кінцевого користувача (конструктора, технолога) створення параметричних та структурних різновидів досліджуваного об'єкта або технологічного процесу;

принцип оптимальності, який обумовлює наявність у розроблюваній моделі засобів для визначення раціональних (ефективних) значень прогнозованих параметрів і характеристик відтворюваного предмета чи явища (об'єкта або технологічного процесу);

принцип відкритості та розвитку, який передбачає можливість легкого оновлення й розширення складових компонентів СПГМ.

Слід відмітити, що під час безпосереднього формоутворення наведений вище перелік принципів, як правило, може доповнюватись більш докладними умовами згідно наявних конкретних вимог щодо досліджуваного об'єкта.

Для адаптації базових принципів СПГМ при аналізі основних етапів розробки та використання СПГМ складних об'єктів слід, згідно принципу системного підходу, застосовувати універсальні методичні прийоми поділу досліджуваного об'єкта на окремі складові компоненти з наступним об'єднанням останніх у єдине ціле. Це, у свою чергу, передбачає, п'ять основних кроків [9, 48–52]:

1) *Аналіз досліджуваного об'єкта та розбиття його на окремі елементи*. Відповідно до принципу варіантності, потрібно всебічно розглянути можливі структурно-параметричні різновиди елементної бази.

2) *Визначення зв'язків між виділеними частинами, тобто розроблення структури предмета або технологічного процесу, що моделюється*.

3) *Опрацювання порядку синтезу даного об'єкта, формування інтегральних характеристик і параметрів для забезпечення зручного та*

ефективного включення досліджуваного об'єкта до складу геометричних систем більш високої ієрархії.

4) Побудова нових, або застосування вже існуючих математичних моделей для наявних елементів і зв'язків між ними. Згідно принципу комплексного підходу, детерміновані геометричні дані, як об'єктивна та узгоджуюча основа, можуть доповнюватися фізичними (геометричними) та математичними моделями досліджуваного об'єкта з інших дисциплін.

5) Проведення оптимального, відповідно до заданих умов, формоутворення досліджуваного об'єкта.

Виходячи з вищесказаного, представляється доцільним теоретичне і прикладне застосування цієї перспективної сучасної методології автоматизованого проектування для детермінування конструкторсько-технологічних параметрів базових процесів і обладнання (інструменту) при одержанні високоякісних виробів з реактопластичних КВМ.

2.6. Напрацювання дослідників з геометричного моделювання процесів та обладнання для одержання реактопластичних КВМ

На кафедрі нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки (НГІКГ) КПІ імені Ігоря Сікорського науковою школою під керівництвом д.т.н., професора, заслуженого працівника народної освіти України Ваніна В.В., а також д.т.н., професора Вірченка Г.А. вперше в Україні розроблено сучасну методологію структурно-параметричного варіантного формоутворення (геометричного моделювання) складних технічних систем у машинобудуванні в умовах сучасних інтегрованих інформаційних технологій.

В рамках виконаних досліджень науковцями вищевказаної наукової школи запропоновано застосування структурно-параметричних геометричних засобів для пошуку глобальних екстремумів у різноманітних задачах оптимізації. Зокрема, розроблено алгоритм візуалізації багатовимірних об'єктів, здійснено програмну реалізацію розроблених математичних моделей та проведено комп'ютерні експерименти для апробації одержаних результатів у машинобудуванні та у літакобудуванні [<http://ng-kg.kpi.ua/>].

Нині на кафедрі НГІКГ продовжуються теоретичні та експериментальні роботи з геометричного моделювання окремих процесів та обладнання для виготовлення реактопластичних КВМ. Так, у роботі [32] вирішувалась актуальна проблема геометричного моделювання формоутворення оболонок нерозгортних поверхонь, виготовлених із полімерних композиційних матеріалів на тканинній основі.

Ці дослідження були продовжені в роботах [33 – 35]. У працях [33 – 34] вивчались окремі аспекти щодо автоматизації намотувального обладнання шляхом геометричного моделювання процесу намотування, зокрема, дослідження форми поверхні полімерної стрічки з волоконних оправок різної форми при виробництві композитних деталей.

В роботі [35] започатковано застосування комп'ютерного СПГМ для здійснення комплексної оптимізації технологічного процесу створення

технічних виробів з композитних матеріалів на прикладі виготовлення частини трубопроводу методом намотування з вуглецевих композитів.

В роботах інших вітчизняних науковців, що не входять до наукової школи кафедри НГІКГ, наприклад, [36], вивчались питання геометричного моделювання структурних армуючих елементів КВМ на прикладі намотування одиночної нитки на поверхні обертання. В результаті проведених досліджень була розроблена і впроваджена комплексна модель розрахунку форми меридіану фасонних поверхонь обертання, у яких середня кривизна змінюється вздовж осі за наперед заданим законом, та за умови зміцнення цих поверхонь шляхом геодезичного намотування нитки.

Проблема автоматизації намотувального обладнання шляхом геометричного моделювання процесу намотування та вдосконалення використовуваних для цього адаптивних верстатів з системою «технічного зору» досліджувалась в роботі [37], де аналізувались базові схеми армування виробів у вигляді поверхонь обертання, використовуючи для армування плоску полімерну стрічку.

У роботах зарубіжних вчених проблема розроблення підходів до геометричного моделювання технологічних процесів намотування і викладення конструкцій з КВМ також займає чільне місце [38 – 40]. Так, в роботі [38] для математичного опису поверхонь оправок використовували метод Кунса, створюючи на його основі тривимірні об'єкти. Інший клас модельованих об'єктів створювався за допомогою плоских паралельних перерізів на точковому каркасі.

Серед найбільш значних результатів останніх років з досліджуваної проблеми можна відзначити такі [39, 40]. Розроблено новий математичний апарат для геометричного моделювання технологічних процесів намотування і викладення конструкцій з КВМ. Створено теоретичні основи, узагальнюючі всі існуючі методи моделювання цих процесів. Розроблено комп'ютерні моделі, що слугують для якісного аналізу обраної схеми укладання стрічки на поверхню на предмет можливості виготовлення виробу за даною схемою армування.

Що стосується особливостей геометричного моделювання нестационарного технологічного процесу як такого, то тут насамперед слід відзначити труднощі в геометричному та комп'ютерному моделюванні зазначених процесів у порівнянні зі стаціонарними процесами, до яких можна віднести процеси геодезичного намотування та викладки нитки чи стрічки на оправку різної форми геометричної поверхні.

Як типовий приклад, можна навести роботу [12], в якій описано створену методологію геометричного моделювання для проектування технологічних параметрів процесів на прикладі перебігу фізичних процесів та розв'язання на визначених засадах завдань прогнозування й управління цими процесами.

Як практична реалізація проведених досліджень, автором була запропонована оптимізація технологічного процесу фільтрування суспензій на камерних фільтр-пресах з вертикальним розташуванням фільтрувальних плит та впровадження розроблених методик у процес проектування й експлуатації фільтрувального обладнання в промисловості, комунальному господарстві та

інших галузях. Таким чином, вище було проаналізоване коло вже вирішених задач з позицій геометричного моделювання досліджуваних процесів та обладнання та обґрунтовано застосування методології СПГМ.

2.7. Особливості підходів до геометричного моделювання процесів і обладнання для виготовлення реактопластичних КВМ

При вирішенні вищевказаного комплексу завдань з геометричного моделювання процесів та обладнання для виготовлення високоміцних й бездефектних реактопластичних КВМ повинні враховуватися наступні особливості такого моделювання.

По-перше, завдання з геометричного моделювання технології виробництва, де присутні нестационарні процеси та стохастичність, в т.ч. при виготовленні виробів з реактопластичних КВМ, є більш складними, наприклад, у порівнянні з моделюванням топографічних поверхонь, які є стаціонарними в часі і для яких наперед відомий закон зміни руху армуючих елементів (сформованих ниток, стрічок постійного перетину).

По-друге, розглядаючи базовий процес «мокрого» намотування, в якому ОВН у вигляді нитки намотують на поверхню (т.зв. геодезичне намотування нитки), для його автоматизації необхідно «перевести» отримувані поверхні в геометричні моделі за допомогою відповідних алгоритмів. За цією аналогією, для базового процесу «вільного» просочування бажано створити узагальнену геометричну модель зазначеного процесу, що надає практичний та зручний інструмент для аналізу і корекції схеми армування ОВН і геометричних параметрів змотувального й просочувального обладнання.

По-третє, властивості КВМ на основі ОВН жгутового або тканого типу залежать від геометричного розміщення мікронаповнювачів у структурі КВМ. Подібні завдання геометричного моделювання мікроструктури таких ОВН вирішуються спеціальними методами (наприклад, геометричних ймовірностей та інтегральної геометрії) і вимагають для своєї реалізації розроблення спеціальних алгоритмів.

Як типове завдання можна навести таке: дослідити залежність якості одержаного тканого чи джгутового КВМ від поставлених початкових (технологічних) умов, або від того, що задано при проектуванні на вході (наприклад, % тканого наповнювача в структурі КВМ). При зміні початкових умов також змінюються геометричні параметри формуючого обладнання (змотувального, просочувального, намотувального) для виробництва таких тканих КВМ.

По-четверте, вищевказані комплексні завдання можуть бути вирішені із застосуванням методології СПГМ, яка тільки починає розвиватися. Використання цієї методології дозволяє підібрати оптимальні геометричні параметри технологічного обладнання в залежності від поставлених початкових (технологічних) умов.

Неврахування вищезазначеного спектру особливостей може призвести до некоректних кінцевих результатів при здійсненні автоматизованого проектування зазначених процесів та обладнання.

3. РОЗБИТТЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ІННОВАЦІЙНОГО ОДЕРЖАННЯ РЕАКТОПЛАСТИЧНИХ КВМ З ВИКОРИСТАННЯМ УЗ НА ОКРЕМІ СТРУКТУРНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА АНАЛІЗ ФОРМОУТВОРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЩО ВХОДЯТЬ ДО ЇХ СКЛАДУ

У розділі 3 досліджуються теоретичні аспекти розбиття технологічної схеми інноваційного одержання КВМ з використанням УЗ на окремі структуровані блоки й аналізуються формоутворювальні елементи, що входять до цих блоків, з позицій методології СПГМ. Аналізується технологія одержання реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ як об'єкт структурно-параметричного геометричного моделювання. Коротко охарактеризовано застосування методології СПГМ для оптимізації технологічних параметрів процесу «вільного» просочування і конструктивних елементів УЗ-обладнання при формуванні КВМ. Зроблено висновки до другого розділу [19 – 27].

3.1. Узагальнена схема інноваційного одержання реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ

На рис. 3.1 показана загальна схема інноваційного виробництва реактопластичних КВМ із використанням низькочастотної УЗ-обробки [26].

Основні етапи одержання реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ-обробки за цією схемою полягають у наступному [26]. Попередньо, до стадії просочування, проводять УЗ-обробку ЕС в ємності 17 за допомогою УЗ-концентратора 16, що має кілька форм виконання твірної. УЗ-концентратор підключений до ПМС 15, який живиться від УЗГ 14 (блок I на рис. 2.1).

Залежно від вибраної геометрії, а також розмірів УЗ-концентратора 16 на виході отримують певне значення амплітуди A та інтенсивності I УЗК, що вводяться в рідку ЕС.

Контрольовані параметри УЗ-обробки при приготуванні ЕК такі: час τ , температура T , амплітуда A , інтенсивність I .

Після УЗ-обробки ЕС з ємності 18 в ємність 17 надходить твердник, відбувається змішування ЕС з її твердником за допомогою того ж УЗ-концентратора протягом декількох секунд, в результаті чого одержують просочувальну композицію (ЕК або ЕЗ).

Далі відкривають кран 19 і просочувальну композицію подають у ванну 1. Після цього відбувається змотування з бобіни 5 сухого довгомірного ВН 4, який після проходження огинаючого валка 6 надходить у ванну 1, де він просочується рідким ПЗ 2, вже обробленим за допомогою УЗ (блок II на рис. 3.1).

При цьому можливі кілька структурних форм розміщення довгомірних волокон у перетині просоченого ВН, що впливають на кінетику процесу «вільного» просочування. Після виходу з просочувальної ванни 1 забезпечується попереднє неконтрольоване нанесення ПЗ 2 на довгомірний ВН 4.

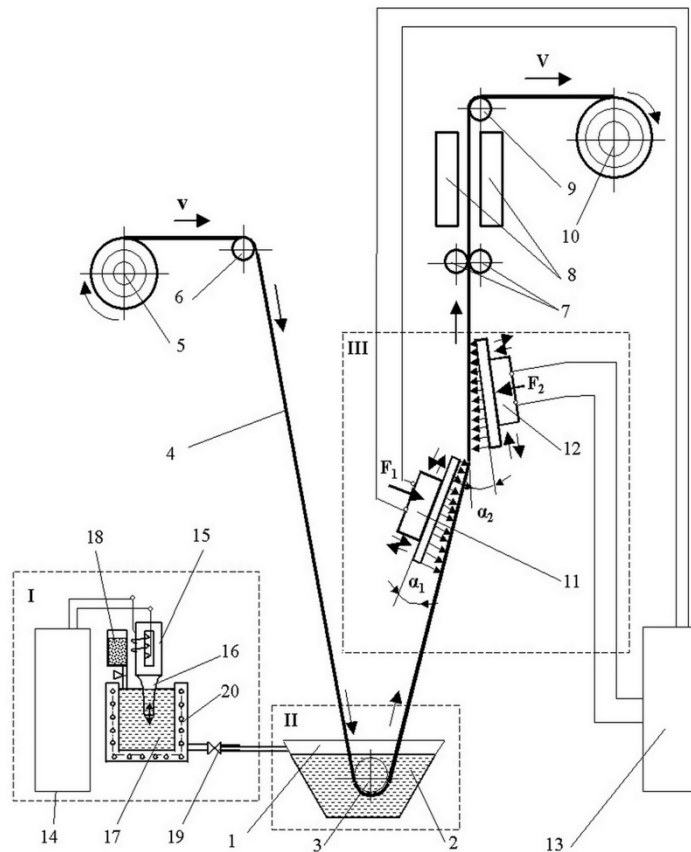


Рис. 3.1. Структурна схема просочування і дозованого нанесення ПЗ на довгомірний ВН з використанням УЗ [26]:

- 1 – просочувальна ванна;
- 2 – рідке ПЗ;
- 3 – огинаячий валок у просочувальній ванні;
- 4 – довгомірний ВН;
- 5 – бобіна з сухим ВН;
- 6, 9 – огинаячі валки;
- 7 – віджимні валки;
- 8 – сушильна камера;
- 10 – приймальна бобіна;
- 11, 12 – пара робочих УЗ-інструментів (випромінюючих УЗ пластин);
- 13, 14 – УЗ-генератори;
- 15 – ПМС;
- 16 – хвилевід-концентратор УЗ;
- 17 – ємність з ЕС;
- 18 – ємність з твердником ЕС;
- 19 – кран;
- 20 – терморегулюючий осередок;
- F_1 і F_2 – зусилля притискання робочих інструментів 11 і 12 до просоченого ВН;
- α_1 і α_2 – кути нахилу робочих інструментів 11 і 12 до поверхні просоченого ВН

Даний матеріал у зоні дозування (блок III на рис. 3.1) обробляють з обох боків УЗ-інструментами у вигляді випромінюючих УЗ прямокутних пластин 11 і 12, що мають індивідуальні приводи від УЗГ 13.

Ці пластини 11 і 12 контактують з ВН 4, який просочився і який обробляється ребром пластини зі змінними зусиллями притиску F_1 і F_2 відповідно. УЗК поширюються як по ширині, так і по довжині пластин 11 і 12. Причому інструменти 11 і 12 розташовані зі зміщенням один щодо одного по довжині матеріалу 4, оброблюваного по обидва боки щодо нього, і під різними кутами нахилу α_1 і α_2 до площини матеріалу.

У свою чергу, робочі УЗ-інструменти 11 і 12 на базі ПЕП і прямокутної випромінюючої пластини складаються з декількох послідовно розташованих структурних елементів різної форми та розмірів, до того ж виконаних із різних матеріалів. Варіювання вмісту ПЗ, рівномірність його розподілу в матеріалі та видалення надлишку зв'язуючого регулюють кутами нахилу α_1 і α_2 випромінюючої пластини до поверхні матеріалу 4, зміною потужності (інтенсивності I_1 і I_2), що підводиться до перетворювачів, а також варіюванням зусиль притискання F_1 і F_2 .

Остаточне віджимання зв'язуючого з просоченого матеріалу проводять засобом віджимання матеріалу, виконаного у вигляді двох валків 7. Потім просочений і віджати матеріал надходить у сушильну камеру 8, а після сушіння проходить через огинаючий валок 9 і намотується на приймальну бобіну 10.

При використанні розробленої технології та обладнання залежність величини нанесення від швидкості протягування просоченого матеріалу значною мірою виключається, крім того відбувається дегазація повітря зі структури просоченого матеріалу за рахунок контактної УЗ-дії.

3.2. Розбиття схеми інноваційного одержання КВМ на окремі структуровані технологічні блоки

Виходячи з принципу системного підходу, що передбачає аналіз досліджуваного об'єкта одночасно і як безлічі певних взаємопов'язаних між собою елементів, і як потенційного компонента вищого ієрархічного рівня, представляється доцільним поділити зображену на рис.3.1 схему на такі окремі структуровані блоки I – III, які будуть надалі досліджуватися:

I – блок (базовий процес) УЗ-обробки ЕС і приготування просочувальної композиції (ЕК, ЕЗ чи ПЗ);

II – блок (базовий процес) «вільного» просочування ОВН рідким ПЗ;

III – блок (базовий процес) дозованого нанесення рідкого ПЗ на просочений ВН.

Зазначимо, що в подальшому аналізуються тільки вищевказані укрупнені (базові) блоки та їхні складові структурні елементи, а також взаємозв'язки між ними, в рамках проведення синтезу. При цьому відомо, що дослідження й моделювання всього технологічного циклу одержання високоміцних й бездефектних реактопластичних КВМ і всього комплексу реалізуючого його устаткування є виключно складним завданням, яке досі не вирішене [26].

3.3. Технологія одержання реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ як об'єкт структурно-параметричного геометричного моделювання

У відповідності зі структурно-параметричною методологією [26], довільний модельований об'єкт O подається як впорядкована множина його елементів

$$O = (o_i)_1^N. \quad (3.1)$$

Можливі різновиди o_i відображаються кортежами варіантів

$$o_i = (o_{ij})_1^{N_i} \quad (3.2)$$

і векторами параметрів

$$P_{ij} = (p_{ijk})_1^{Np_{ij}}, \quad (3.3)$$

де Np_{ij} – число параметрів j -го варіанта i -го елемента.

Структурний взаємозв'язок між різновидами n -ї і m -ї складових об'єкта O відображають матриці суміжності

$$C_{nm} = \|c_{nr} c_{ms}\|; \quad n \in N; \quad m \in N; \quad n \neq m, \quad r \in \{1, \dots, N_n\}; \quad s \in \{1, \dots, N_m\}, \quad (3.4)$$

де $c_{nr} c_{ms} \neq 0$ при можливій взаємодії варіантів o_{nr} і o_{ms} , і $c_{nr} c_{ms} = 0$ – в протилежному випадку.

У результаті використання співвідношень (3.1) – (3.4) аналізований об'єкт подається як множина його проектних варіантів

$$O = (O_k)_1^{N_o}.$$

Загальновідомо, що найбільш наочними та зручними засобами для відтворення різноманітних структур є графи. На рис. 3.2 наведені деякі компоненти структурної моделі досліджуваного об'єкта O .

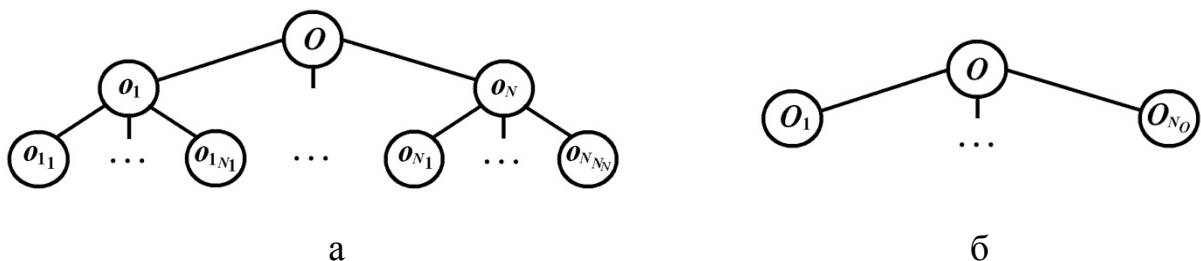


Рис. 3.2. Компоненти структурної моделі об'єкта O :

а – граф структури; б – граф варіантів

На підставі вищевикладених відомостей структуру верхнього ієрархічного рівня розглянутої технології T одержання реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ можна зобразити у вигляді зображеного на рис. 3.3 графа.

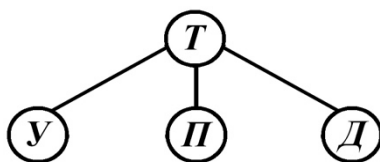


Рис. 3.3. Верхній ієрархічний рівень структурної моделі технології T одержання високоміцних реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ:

$У$ – блок (базовий процес) УЗ-обробки ЕС і приготування просочувальної композиції;

$П$ – блок (базовий процес) «вільного» просочування ВН рідким ПЗ;

$Д$ – блок (базовий процес) дозованого нанесення ПЗ на просочений ВН

Тут через $У$, $П$, $Д$ позначені, згідно рис. 3.1, відповідно блок I УЗ-обробки ЕС і приготування просочувальної композиції, блок II просочування ВН рідким ПЗ і блок III дозованого нанесення рідкого ПЗ на просочений ВН.

Декомпозиція в процесі розробки технології має, як правило, ієрархічний характер. Тобто, для кожної її частини, наприклад, показаного на рис. 3.3 блоку дозування $Д$, може бути створена певна структурна модель показаного на рис.3.2,б виду. Зазначеним чином додається новий ієрархічний рівень, що більш детально описує досліджуваний об'єкт або процес.

Слід зауважити, що на практиці вищенаведена декомпозиція проводиться з урахуванням багатьох аспектів, зокрема, енергозбереження, міцності, продуктивності, а також має значно більше, ніж розглянуто, ієрархічних рівнів.

Наступним етапом структурно-параметричного моделювання, після розробки декомпозиції проектного об'єкта, є створення механізму його синтезу з окремих складових. У процесі вирішення цього завдання визначається порядок об'єднання елементів, можливий їх взаємозв'язок, загальна кількість варіантів об'єкта та їх структура.

3.3.1. Структурно-параметричне геометричне моделювання формоутворювальних елементів, що входять до блоку УЗ-обробки епоксидної смоли

Вище було зазначено, що один із шляхів розв'язання багатьох інженерних задач у різних сферах промисловості базується на широкому використанні УЗ-обробки та відповідної апаратури, яка характеризується універсальністю та порівняно малою енергоємністю [53-55]. Тому оптимізація конструктивно-

технологічних параметрів УЗ-обладнання є актуальним у наш час науково-прикладним завданням.

При цьому на перший план виходять питання створення узагальненої теорії та на її засадах продуктивних методів і моделей для раціонального вибору елементів опрацьовуваних технічних систем.

Слід зазначити, що нині наявний широкий спектр методик розрахунку УЗ-випромінювачів (хвилеводів) та УЗ-інструментів, виготовлені й апробовані дослідно-промислові зразки різноманітного технологічного устаткування [56–61], зокрема, цілий ряд багатоопераційних оброблювальних центрів із використанням систем комп'ютерного управління [59].

Ефективним напрямком автоматизованого проектування продукції машинобудування є структурно-параметричний підхід до варіантного формоутворення технічних об'єктів [9, 48, 62–64], що запропонований науковою школою прикладної геометрії Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», огляд головних можливостей якого наведено у виданні [9].

Публікаціями [62–64] показано інваріантний та загальний характер цієї методології, однак зазначено потребу певної її адаптації для конкретної промислової продукції. В роботах [48, 64] проаналізовано застосування комп'ютерного СПГМ як основи проведення комплексної оптимізації процесів проектування та виготовлення виробів машинобудування.

Відносно аспектів СПГМ елементів, що входять в блок І (блок У) УЗ-обробки ЕС і приготування просочувальної композиції, зазначимо, що основним елементом цього блоку є УЗ-концентратор (трансформатор швидкості) 16 (див. рис. 3.1), що має кілька форм виконання (див. рис. 3.4).

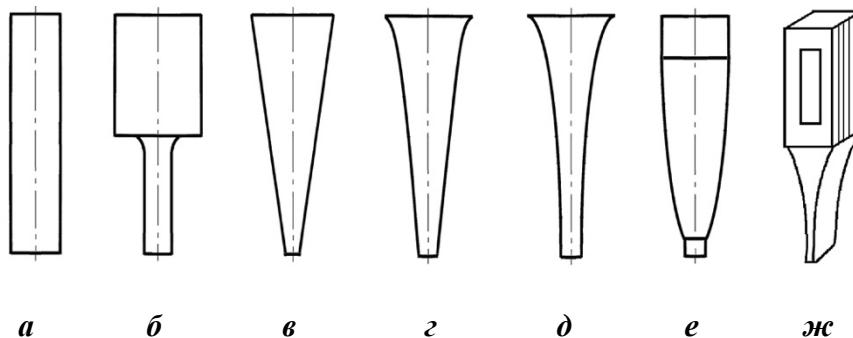


Рис. 3.4. Типові форми виконання напівхвильових трансформаторів швидкості:

a – циліндричний;

б – циліндричний двоступінчастий;

в – конічний;

г – експонентний;

д – катеноїдальний;

е – краплеподібний;

ж – ножовий з експонентною зміною прямокутного перерізу

Головною технологічною характеристикою зазначеного інструменту є коефіцієнт посилення k амплітуди коливань A на його торці.

Застосування в якості критерію ефективності тільки коефіцієнта посилення k_n , рівного відношенню площ вхідного та вихідного торців трансформатора швидкості, в загальному випадку, не завжди є коректним вирішенням поставленого завдання проектування даного інструменту. Необхідно також брати до уваги й ряд додаткових факторів [26].

Наприклад, треба враховувати, що при великих значеннях коефіцієнта посилення амплітуди k_n УЗ-концентратор досить часто характеризується нестійкою роботою, що, в свою чергу, негативно позначається на його продуктивності і довговічності.

Досить нестійкими є циліндричні ступінчасті концентратори з великим перепадом діаметрів, в той час як конічні – найбільш стійкі. Важливим фактором є простота промислового виготовлення конкретного типу концентратора. Для забезпечення максимальної продуктивності при обробці рідких середовищ бажано мати також велику площу торцевих випромінюючих поверхонь трансформаторів швидкості.

Таким чином, оптимальний вибір концентраторів повинен здійснюватися не тільки за критерієм максимального збільшення амплітуди коливань A , але і беручи до уваги ряд інших факторів, зокрема, розглянутих вище, з урахуванням їх вагових коефіцієнтів, що встановлюються, наприклад, методом експертних оцінок.

Згідно рис. 3.4, склад зображених УЗ-концентраторів визначається наступною впорядкованою множиною:

$$K = (K_i)_1^{N_K} = (K_i)_1^7, \quad (3.5)$$

де $K_1 = \{\text{циліндричний}\}$, $K_2 = \{\text{циліндричний двоступінчастий}\}$, $K_3 = \{\text{конічний}\}$, $K_4 = \{\text{експонентний}\}$, $K_5 = \{\text{катеноїдальний}\}$, $K_6 = \{\text{краплеподібний}\}$, $K_7 = \{\text{ножовий з експонентною зміною прямокутного перерізу}\}$.

Можливі різновиди проектного інструменту K_i описуються кортежем варіантів

$$K_i = (K_{ij})_1^{N_{K_i}} \quad (3.6)$$

і векторами параметрів

$$P_{ij} = (p_{ijk})_1^{N_{P_{ij}}}, \quad (3.7)$$

де $N_{P_{ij}}$ – кількість параметрів j -го варіанта i -го УЗ-концентратора.

Співвідношенням (3.5) – (3.7) відповідають показані на рис. 3.5 графи. На рис.3.5,а дуги моделюють певні аналітичні залежності між конструкторсько-технологічними параметрами і характеристиками варіантів досліджуваних УЗ-трансформаторів швидкості.

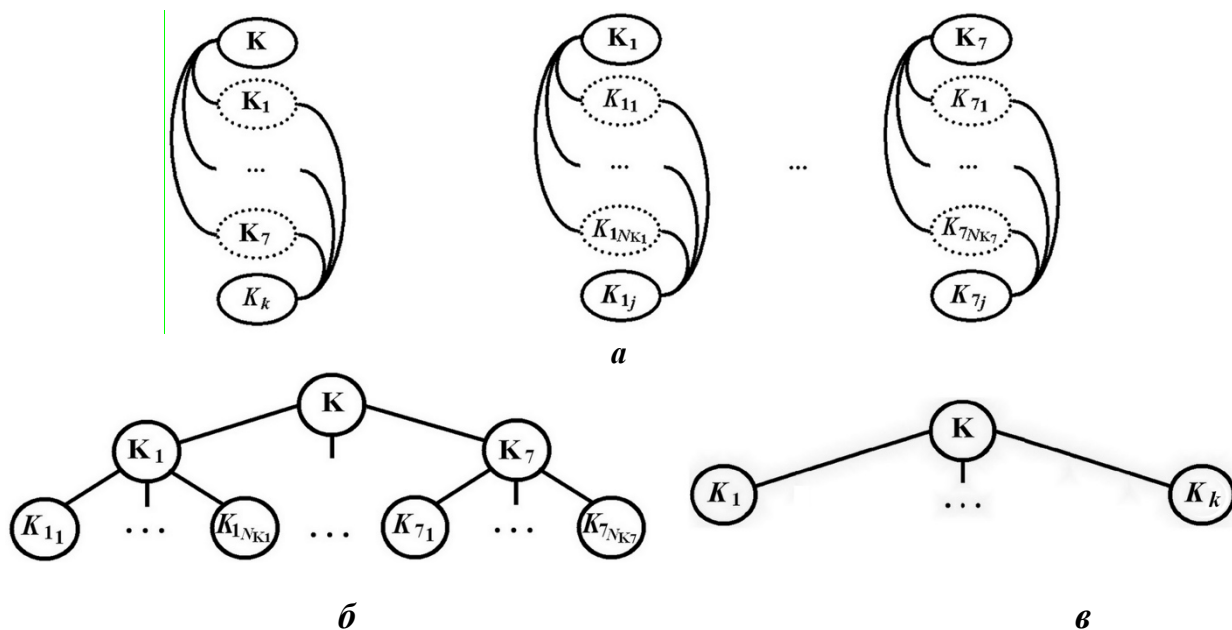


Рис. 3.5. Компоненти структурно-параметричної моделі
УЗ-концентраторів:

a – графи синтезу варіантів;

б – ієрархічне дерево проектної структури;

в – граф вихідної множини варіантів.

Для здійснення структурно-параметричної оптимізації довжини зазначених дуг узгоджуються зі значеннями необхідної багатокритеріальної цільової функції.

Надалі в кожній вершині графа розраховується кортеж індексів для наявних дуг згідно з їх довжинами. Така індексація забезпечує обчислення необхідних оптимальних проектних різновидів проєктованих УЗ-концентраторів

$$K = (K_k)_1^{N_k}. \quad (3.8)$$

Елементи множини (3.8) упорядковані у відповідності зі значеннями цільової функції, яка за допомогою експертних вагових коефіцієнтів дозволяє комплексно оцінювати конструкторсько-технологічні параметри та характеристики створюваних проектних варіантів різних типів УЗ-хвильоводів-концентраторів.

Перелічені вище аспекти можуть бути прийняті за основу під час опрацювання нових методик автоматизованого варіантного конструювання акустичних концентраторів УЗ-технологічного обладнання.

Це передбачає автоматизоване проєктування з використанням комп'ютерних геометричних моделей, які наочно відображають існуючі варіаційні взаємозв'язки між параметрами форми та розмірів досліджуваних виробів.

При цьому також повинно бути розглянуто питання забезпечення ефективної взаємодії побудованих геометричних та інших розрахункових моделей для створюваних технічних об'єктів.

3.3.2. Структурно-параметричне геометричне моделювання формоутворювальних елементів, що входять до блоку «вільного» просочування

Блок II (блок П) – це блок просочування ВН рідким ПЗ. Основними формоутворювальними елементами даного блоку є варіанти розміщення армуючих односпрямованих волокон (схема армування) у структурі просоченого ОВН, що визначають ступінь його наповнення в КВМ та інші параметри, які надалі використовуються при моделюванні кінетики процесу «вільного» просочування.

Граничну степінь наповнення або армування в КВМ можна розрахувати, виходячи з щільності геометричної укладки циліндрів, якими апроксимують мікроструктуру ОВН. На рис. 3.6 показані схеми найбільш щільної і реальної упаковки волокон в структурі ОВН реактопластичних КВМ при їх просочуванні в просочувальній ванні 1.

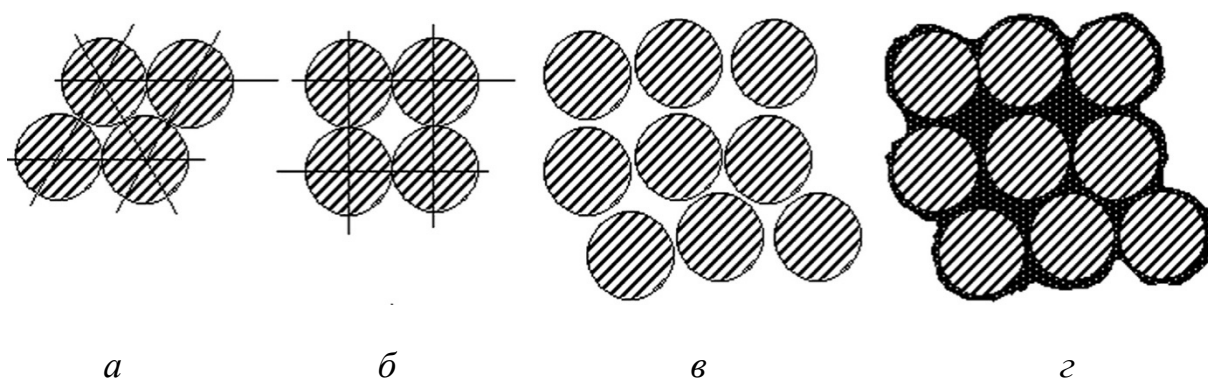


Рис. 3.6. Схеми теоретичної щільної і реальної упаковки волокон та об'ємний вміст волокнистого наповнювача ξ_a в односпрямованих реактопластичних КВМ:

a – гексагональна упаковка (по паралелограму, $\xi_a = 0,907$);

б – упаковка по квадрату, $\xi_a = 0,785$;

в – реальна односпрямована упаковка, $\xi_a = 0,6 - 0,75$;

г – реальна односпрямована упаковка волокон у зв'язуючій полімерній матриці (зачернена)

Слід зазначити, що представлена на рис. 3.6 *а,б* щільна (теоретична) укладка волокон практично неможлива і вкрай небажана, оскільки необхідно, щоб кожне волокно було оточене шаром матриці (ПЗ) для забезпечення найбільш високої адгезії волокон і отримання монолітності композиту та кінцевого виробу на його основі [1, 26].

У практиці одержання КВМ та виробів із них зазвичай вказується співвідношення компонентів за масою, яке в разі конструювання високоміцних виробів з високими ступіннями армування слід перераховувати на об'ємну ступінь армування χ з урахуванням щільності компонентів.

Тому в практичній діяльності (див. рис. 3.6, *в*) при одержанні КВМ та виробів на їх основі з оптимальними фізико-механічними характеристиками застосовується об'ємний ступінь армування $\xi_a = 0,6 - 0,75$.

На базі певної схеми упаковки волокон в структурі ОВН (див. рис. 3.6) вибирається відповідна геометрична модель, яка, враховуючи можливість зведення досліджуваних реальних стохастичних структур ОВН до подвійноперіодичних структур, детермінується із застосуванням апарату теорії інтегральної геометрії та геометричних ймовірностей. Критерієм адекватності при цьому є збіг (з достатньою точністю) кривих розподілів, що характеризують відстань між суміжними волокнами (колами) і діаметрів волокон (кіл), в геометричній моделі та в реальній структурі ОВН [65 – 67].

Таким чином, можна зробити висновок, що основними формоутворювальними елементами, які входять до другого структурного блоку технологічної схеми одержання КВМ, є порядок розміщення (або схема армування) ОВН у мікроструктурі КВМ.

Адже у залежності від геометричних параметрів розміщення ОВН й зусилля його натягнення (що можна розглядати як початкові або вхідні умови технологічного процесу «вільного» просочування) змінюються геометричні параметри змотувального й просочувального обладнання, а також вигляд модельних кінетичних параметрів базового процесу «вільного» просочування.

Надалі геометричні параметри знайденої геометричної моделі ОВН використовуються як інтеграційний фактор для детермінації параметрів уточненої геометричної та комп'ютерної моделей технологічного процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ПЗ, а саме ЕС.

При цьому визначається ефективний (еквівалентний) капілярний радіус геометричної моделі структури ОВН, що входить у формулу для обчислення прогнозованих кінетичних параметрів процесу «вільного» просочування [28 – 30, 68 – 69].

3.3.3. Структурно-параметричне геометричне моделювання формоутворювальних елементів, що входять до блоку дозування

Блок III – це блок дозованого нанесення (блок *Д*) ПЗ на просочений ВН. Основним формоутворюючим елементом даного блоку є робочі УЗ-інструменти 11 і 12 (див. рис. 3.1), що складаються з декількох послідовно

розташованих структурних елементів різної геометричної форми та розмірів, до того ж деякі з них виконані з різних матеріалів.

Схема регулярного розміщення УЗ-вібраторів на нижній поверхні робочої випромінюючої пластини, яка здійснює резонансні вигинні коливання, порядок розміщення та підключення УЗ-вібраторів, зібраних на ПЕП, на нижній частині випромінюючої пластини уздовж її довжини і на стрижні (хвилеводі), які здійснюють вигинні коливання, а також розрахункова схема однохвильового УЗ-диспергатора з симетричним пакетним ПЕП наведені в роботі [61].

Вище було відзначено, що саме резонансний режим згинальних коливань випромінюючої пластини є головним чинником, з яким слід узгоджувати резонансну частоту поздовжніх коливань складових ПЕП, що кріпляться до нижньої поверхні випромінюючої прямокутної пластини [4–5, 55–56].

Наприклад, для робочого УЗ-інструменту блоку дозування D , який більш докладно розглядається в розділі 5, впорядкована множина

$$D = (D_1, D_6, D_8, D_9, D_{10}, D_{11}) \quad (3.9)$$

визначає порядок об'єднання частин робочого УЗ-інструменту на основі ПЕП, який, у свою чергу, складається з послідовно з'єднаних і контактуючих між собою елементів (починаючи знизу вгору [61], де підрядкові індекси в (3.9) визначаються послідовним розміщенням і відповідними номерами позицій конструктивних елементів):

D_1 – випромінюючий циліндр еквівалентного перетину, що моделює частину випромінюючої пластини;

D_6 – ПЕП;

D_8, D_{10} – знижуючі частоту накладки;

D_9 – електрод (товщиною 0,2 – 0,3 мм);

D_{11} – складений у вигляді двох різновеликих циліндрів концентратор УЗК (трансформатор швидкості).

Можливі взаємозв'язки між варіантами поверхонь частин робочого УЗ-інструменту (3.9) характеризують матриці суміжності виду (3.4), які визначають досліджувану множину варіантів робочих інструментів блоку дозування D .

На рис. 3.7 схематично, у вигляді чотирьох основних етапів, показана послідовність проведення та впровадження результатів досліджень з геометричного та комп'ютерного моделювання технічних засобів для одержання високоміцних й бездефектних реактопластичних КВМ з використанням УЗ на базі методології СПГМ, що є стрижнем досліджуваних у навчальному посібнику задач.



Рис. 3.7. Послідовність проведення досліджень із конструкторсько-технологічного автоматизованого проектування технічних засобів для одержання високоміцних та бездефектних намотувальних конструкцій зреактопластичних КВМ з використанням УЗ на базі структурно-параметричного моделювання

4. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ХВИЛЕВОДІВ ТА КОНЦЕНТРАТОРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

У цьому розділі розглядаються питання застосування методології СПГМ для оптимізації конструкції хвильоводів і концентраторів УЗ-технологічного обладнання. Зокрема, описується розроблена методика використання структурно-параметричного формоутворення для оптимізації конструкції хвильоводів і концентраторів. На її базі здійснено варіантне параметричне конструювання простих та комбінованих (складених) акустичних УЗ-концентраторів. Проілюстровано практичне використання напрацьованих методів моделювання [70 – 78].

4.1. Конструктивно-технологічні особливості будови хвильоводів і концентраторів УЗ

Особливості конструювання хвильоводів і концентраторів УЗ полягають у складності розв'язання задачі оптимізації конструкції хвильоводів і концентраторів у загальному випадку. Це обумовлено необхідністю дослідження комплексу питань, спрямованих на виявлення та вивчення взаємозв'язків між механічними й геометричними параметрами проєктованих УЗ-інструментів, з одного боку, та технологічними факторами їх виробництва, з іншого [60 – 68].

Для досягнення високих показників УЗ-обробки необхідно забезпечити, по-перше, заданий напрямок введення коливань у робочу зону, по-друге, амплітуду коливань A , достатню для ефективного протікання процесу й таку, що при цьому змінюється незначним чином.

Відомо, що базовим функціональним компонентом різноманітного УЗ-обладнання є коливальна система, яка перетворює електричні сигнали УЗГ у механічні коливання [4–5, 43–44, 53–57]. Тенденція останніх років зводиться до переважного застосування в технологічних установках коливальних систем на основі п'єзокерамічних елементів, що не потребують водяного охолодження. Проте, при роботі в рідких середовищах доцільно використовувати потужніші системи на базі ПМС, до яких приєднані хвильоводи-концентратори.

Перші конструктивно простіші та легше збираються, оскільки складаються з ПЕП у вигляді однієї або кількох пар кілець, хвильоводу, відбивача, стягуючого елемента та концентратора [4 – 5].

Другий тип перетворювачів виготовляють у вигляді пакета пластин товщиною 0,1–0,2 мм із магнітострикційного матеріалу. Однак, при цьому значні втрати енергії обумовлюють відносно низький коефіцієнт корисної дії (порядку 40–50%) та необхідність постійного водяного охолодження.

Коливальна система, див. рис. 4.1, у загальному випадку містить перетворювач, узгоджувальний елемент (концентратор) та робочий інструмент.

Електроакустичний перетворювач 1 передає коливання концентратору 4,

який призначений для збільшення амплітуди A коливань. Живлення перетворювача здійснюється від УЗГ (на рис. 4.1 не зображений). До торця 9 трансформатора швидкості 4 за необхідності за допомогою зварювання, нарізowego з'єднання або цангового затискання може кріпитися робочий інструмент 5, який є своєрідним продовженням концентратора.

Довжина коливальної системи кратна довжині хвилі λ коливань в обраному матеріалі трансформатора швидкості при частоті f . При цьому вузли кріплення системи розташовуються у вузлах коливань, щоб виключити поширення хвилі на корпус технологічної установки, приєднана маса якої здатна викликати неприпустиме зниження амплітуди або гасіння коливань. Кріплення для нерухомих систем може забезпечуватися фланцями (на рис. 4.1 не показані) мінімально допустимої товщини.

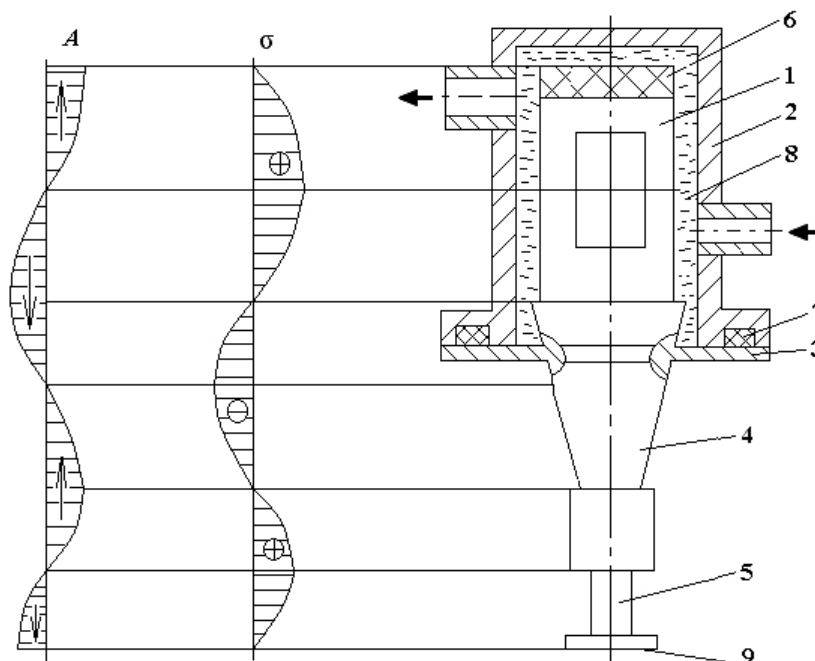


Рис. 4.1. Типова коливальна система в режимі поздовжніх УЗК [70]:

1 – електроакустичний (магнітострикційний) перетворювач;

2 – корпус;

3 – опора;

4 – УЗ-концентратор;

5 – робочий інструмент;

6 – звукопоглинач;

7 – гумове ущільнення;

8 – охолоджуюча рідина;

9 – випромінююча поверхня (торець) трансформатора швидкості;

A – амплітуда УЗК;

σ – амплітуда механічних напружень коливань у матеріалі трансформатора швидкості

При конструюванні резонансних хвелеводів-концентраторів враховують наявність у вузлах коливань максимумів внутрішніх напружень σ (див. рис. 4.1), обумовлених дією статичних, динамічних і високочастотних знакозмінних навантажень, а також рядом інших факторів. При цьому, залежно від призначення УЗ-технологічного обладнання, коливальні системи виконуються довжиною в одну, дві або три півхвилі. Це позначається на положенні пучностей і вузлів амплітуд A , зміщень та напружень σ .

Потреба збільшення амплітуди коливань A хвелеводами-концентраторами пов'язана з тим, що ПЕП забезпечують значення амплітуд максимум 2–3 мкм. Для магнітострикційних перетворювачів дані величини дещо більші – близько 5–10 мкм. Такі малі амплітуди, зазвичай, недостатні для більшості технологічних процесів, що вимагають потужнішого УЗ-устаткування, особливо для зварювання металів і пластмас, оброблення тиском і т.д.

Зауважимо, що оптимізація геометричних параметрів хвелеводів-концентраторів для найбільш простих випадків реалізується теоретичним шляхом, в іншому разі – з використанням різноманітних дослідно-експериментальних прийомів, унаслідок чого збільшується собівартість створюваного технологічного обладнання. Таким чином, важливо вміти заздалегідь раціонально обирати необхідний тип УЗ-коливальних систем та конструкцію їх хвелеводів і концентраторів.

На рис. 4.2 показано вироби, що є металевими круглими стрижнями з потрібною (відповідно до технологічних умов) зміною поперечного перерізу.

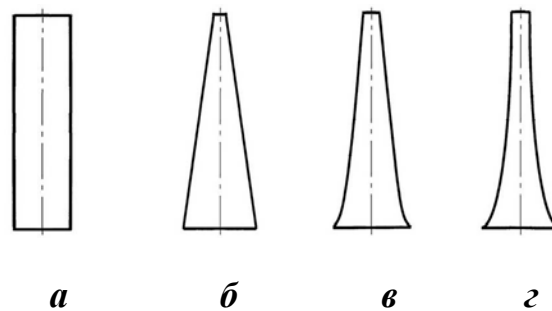


Рис. 4.2. Форми розповсюджених простих акустичних концентраторів:

a – циліндрична;

$б$ – конічна;

$в$ – експонентна;

$г$ – катеноїдальна

Конструктивні особливості хвелеводів-концентраторів зводяться до декількох типів, див. рис. 4.4 і рис. 4.2, основними робочими характеристиками яких є коефіцієнт посилення амплітуди коливань κ_n , положення пучностей напружень σ_e та їх абсолютна величина. При цьому

$$k_n = D_1 / D_2 ,$$

де D_1 і D_2 – відповідно початковий і кінцевий діаметри концентратора.

4.2. Адаптація прийомів структурно-параметричного варіантного формоутворення для оптимізації конструкції хвилеводів і концентраторів

Для мінімізації матеріальних та часових витрат у якості методики для прогнозування геометричних параметрів УЗ-інструментів пропонується використовувати методи і прийоми структурно-параметричного варіантного формоутворення шляхом певної їх адаптації до вирішення проаналізованих завдань конструкторсько-технологічного проектування [70].

Відповідно до рис. 4.2, набір досліджуваних трансформаторів швидкості T задається наступною упорядкованою множиною:

$$T = (T_i)_1^{N_T} = (T_i)_1^7, \quad (4.1)$$

де $T_1 = \{\text{циліндричний постійного перерізу}\}$, $T_2 = \{\text{циліндричний двоступінчастий}\}$, $T_3 = \{\text{конічний}\}$, $T_4 = \{\text{експонентний}\}$, $T_5 = \{\text{катеноїдальний}\}$, $T_6 = \{\text{краплеподібний}\}$, $T_7 = \{\text{ножовий з експоненціальною зміною прямокутного перерізу}\}$.

Можливі різновиди T_i визначаються кортежем варіантів

$$T_i = (T_{i,j})_1^{N_{T_i}}, \quad (4.2)$$

де N_{T_i} – число останніх, та векторами параметрів

$$P_{i,j} = (p_{i,jk})_1^{N_{p_{i,j}}}, \quad (4.3)$$

де $N_{p_{i,j}}$ – кількість параметрів j -го варіанта i -го трансформатора швидкості.

З точки зору структурно-параметричного підходу залежності (4.1) – (4.3) відтворюються у вигляді показаних на рис. 4.4 графів.

У наведених на рис. 4.4, а графах дуги моделюють певні аналітичні залежності між конструкторсько-технологічними параметрами та характеристиками варіантів досліджуваних УЗ-трансформаторів швидкості. Для проведення структурно-параметричної оптимізації довжини цих дуг приводяться у відповідність із значеннями потрібної багатокритеріальної цільової функцій, яка формується з використанням експертних вагових коефіцієнтів.

Надалі в кожній вершині графа розраховується кортеж індексів наявних

дуг згідно з їх довжинами. Така індексація дозволяє обчислювати необхідні оптимальні проектні варіанти опрацьовуваних УЗ-концентраторів.

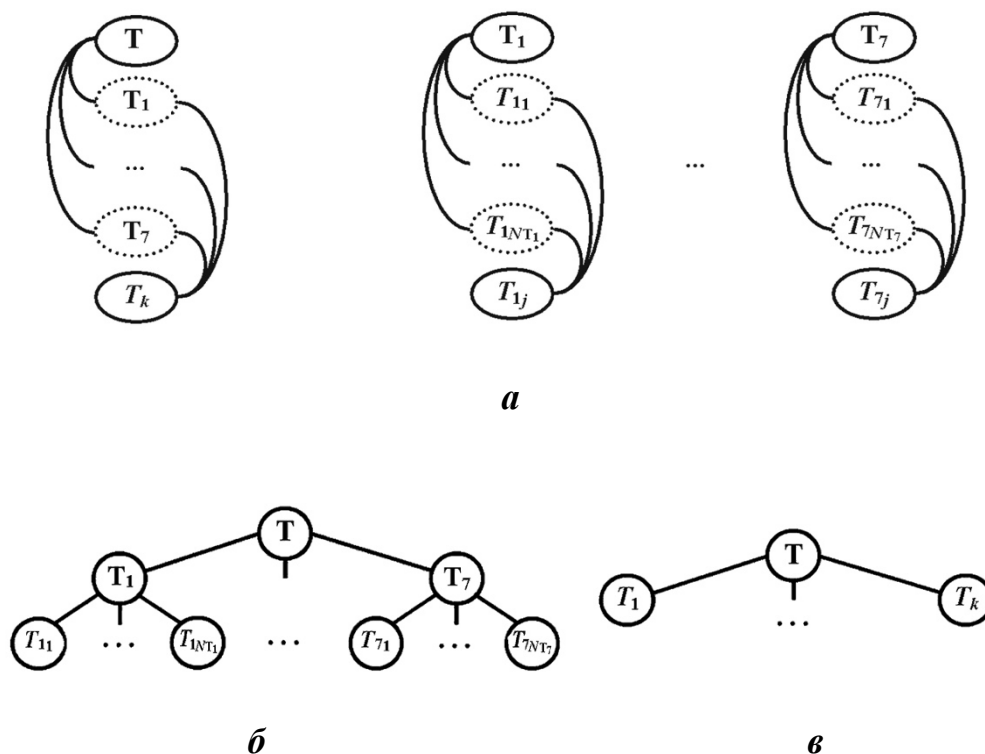


Рис. 4.4. Структурно-параметрична модель трансформатора швидкості T :
a – мережні графи синтезу різновидів;
б – ієрархічне дерево проектної структури;
в – граф вихідної множини варіантів

Отже, викладена методика дозволяє отримати наступний, див. рис. 4.4,в, кортеж різновидів трансформаторів

$$T = (T_k)_1^{N_T}. \quad (4.4)$$

Елементи множини (4.4) упорядковані відповідно до значень цільової функції, яка за допомогою експертних вагових коефіцієнтів дає змогу комплексно оцінити конструкторсько-технологічні параметри та характеристики створених проектних варіантів різних типів опрацьовуваних хвилеводів і концентраторів УЗ-технологічного обладнання (див. Додаток Д).

4.3. Геометричне моделювання простих акустичних концентраторів УЗ

Геометричне моделювання простих акустичних УЗ-концентраторів складається з декількох кроків відповідно до розробленої методики та

алгоритму для її реалізації [71].

Спочатку визначаємо множини форм K досліджуваних типів концентраторів.

Відповідно до рис. 4.2, отримаємо наступний кортеж

$$K = (K_i)_1^4, \quad (4.5)$$

де $K_1 = \{\text{циліндричний}\}$, $K_2 = \{\text{конічний}\}$, $K_3 = \{\text{експонентний}\}$, $K_4 = \{\text{катеноїдальний}\}$.

Далі формується масив матеріалів для виготовлення концентраторів. Нехай, наприклад, він має вигляд табл. 4.1, дані якої упорядковані за зростанням швидкості звуку.

Таблиця 4.1. Властивості матеріалів УЗ-концентраторів

матеріал	щільність ρ , кг/м ³	швидкість звуку c , м/с	модуль пружності E , МПа	міцність на розрив, σ_s , МПа
латунь	8600	3300	$1,0 \cdot 10^5$	320-500
мідь	8900	3700	$1,2 \cdot 10^5$	210-280
титан	4500	4900	$1,1 \cdot 10^5$	500
нікель	8900	5000	$2,0 \cdot 10^5$	220
алюміній	2800	5100	$7,2 \cdot 10^4$	100
сталь	7900	5200	$2,1 \cdot 10^5$	400-500

Після цього створюється кортеж робочих частот f УЗГ. Наприклад, вважатимемо, що

$$f = (f_i)_1^5 = (16 \text{ кГц}, 18 \text{ кГц}, 20 \text{ кГц}, 22 \text{ кГц}, 24 \text{ кГц}). \quad (4.6)$$

Досліджуваний спектр частот f пов'язаний як з варіюванням паспортних (робочих) характеристик УЗГ (частоти, потужності тощо), так і з необхідністю дотримання умов техніки безпеки, які висуваються до величини припустимих рівнів звукового і УЗ-тиску на робочих місцях.

Після цього для концентраторів множини (4.5), шляхом варіювання властивостей матеріалу з табл. 4.1 та частоти f з кортежу (4.6), згідно з наявними в літературних джерелах обчислювальними формулами, зокрема, приведеними в роботах [4, 48], виконуються оптимізаційні розрахунки таких конструктивних параметрів і технічних характеристик, як початковий D_1 та

кінцевий D_2 діаметри, довжина l , площа S_2 випромінюючого торця, коефіцієнт k_n підсилення амплітуди тощо.

При цьому широко застосовується графічне відображення досліджуваних аналітичних залежностей для забезпечення їх наочності та зручності здійснення аналізу.

Під час проведення оптимізації в якості показників використовуються не тільки максимальна величина коефіцієнта k_n підсилення амплітуди A коливань, а і значення площі S_2 випромінюючого торця, мінімальна маса m_k концентратора, стійкість та надійність його при експлуатації, простота виготовлення і т.д. Зазначимо, що обов'язково беруться до уваги наявні обмеження, зокрема, стосовно міцності, максимальної амплітуди A коливань тощо.

Після цього, відповідно до обчислених раціональних параметрів спроектованого акустичного концентратора, будується його твердотільна комп'ютерна геометрична модель у середовищі певної системи автоматизованого проектування.

Проілюструємо докладніше описану вище методику варіантного параметричного конструювання на прикладі формоутворення півхвильового експонентного концентратора. Для цього використовуватимемо подані в публікації [58] математичні співвідношення:

$$S_x = S_1 e^{-ax}, \text{ або } D_x = D_1 e^{-\frac{ax}{2}}, \quad (4.7)$$

де S_x та S_1 – відповідно поточне та початкове значення площі поперечного перерізу концентратора (вздовж його осі x);

a – величина, яка розраховується згідно з формулою:

$$a = 2 \ln k_n / l, \quad (4.8)$$

де $k_n = \sqrt{S_1 / S_2} = D_1 / D_2$ – коефіцієнт підсилення амплітуди коливань;

S_2 – площа випромінюючого торця концентратора;

D_1 , D_2 , l – початковий і кінцевий його діаметри та довжина, що обчислюється як

$$l = \frac{C}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln k_n}{\pi} \right)^2}, \quad (4.9)$$

де C та f – відповідно швидкість та частота УЗ у матеріалі стрижня.

Уявлення про характер співвідношень (4.7) та (4.8) дає рис. 4.5 (а, б).

З останнього, зокрема, видно, що масиву чисел $S_x/S_1 = (0,08; 0,04; 0,01)$, тобто кортежу величин $k_n = (\sqrt{1/0,08}, \sqrt{1/0,04}, \sqrt{1/0,01}) = (3,54; 5; 10)$, відповідають відповідні довжини l для конкретних значень параметра a .

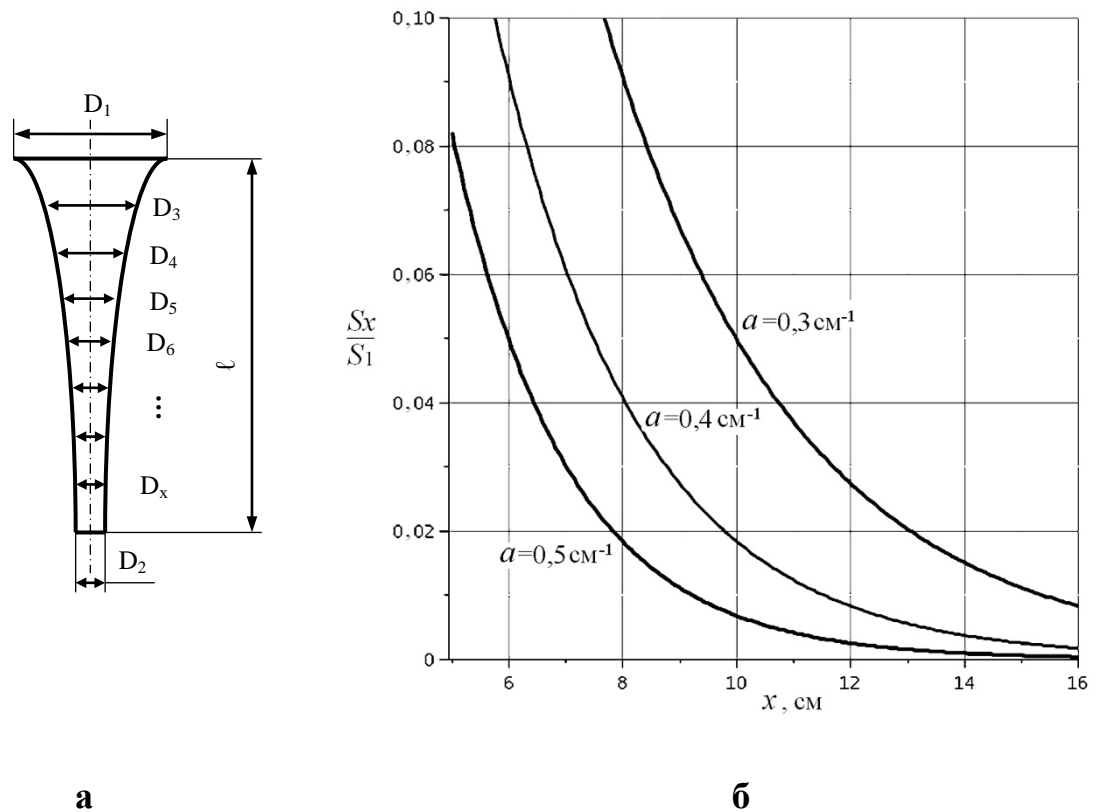


Рис. 4.5. Схема побудови акустичного трансформатора з експонентною зміною поперечного перетину (а) та візуалізація аналітичної залежності (4.7) (б)

Приклад автоматизованих розрахунків, які виконуються в середовищі електронних таблиць OpenOffice Calc згідно з формулою (4.9), показано на рис. 4.6.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Параметричні розрахунки експонентного акустичного концентратора									
2	Вхідні дані:									
3			Латунь	Мідь	Титан	Нікель	Алюміній	Сталь		Значення
4	Швидкість звуку	C, м/с	3300	3700	4900	5000	5100	5200		3700
5										
6	Частота робоча	f, Гц	16000	18000	20000	22000	24000			20000
7										
8	Діаметр початковий	D ₁ , см	min	2,0	max	7,0				6,00
9	Діаметр кінцевий	D ₂ , см	min	0,3	max	1,0				0,80
10										
11	Обчислені величини:									
12	Коефіцієнт підсилення	k _n	7,50		min	4,0	max	16,0		
13	Площа торця	S ₂ , см²	0,50		min	0,2	max	1,0		
14	Довжина концентратора	L, см	10,99		min	5,0	max	12,0		
15										

Рис. 4.6. Обчислення конструктивних параметрів концентратора

При цьому здійснюється варіювання таких параметрів як швидкість звуку у стрижні (вибором матеріалу), робоча частота коливань УЗГ, початковий та кінцевий діаметри поперечних перерізів досліджуваного експонентного акустичного концентратора.

Деякі отримані результати подано на рис. 4.7. У табл. 4.2 приведено розрахунки для міді ($c = 3700$ м/с), УЗ-частоти $f = 20$ кГц і максимального початкового діаметра $D_1 = 7$ см. При цьому бажано було одержати значення k_n не менше 8 та найбільш можливу величину S_2 .

Тенденцію зростання діаметра D_2 , тобто збільшення площі S_2 випромінюючого торця проектованого концентратора відображають другий і третій стовпчики. Належне зменшення коефіцієнта k_n бачимо в його рядку. Зроблені потрібні корективи відтворює останній стовпець даної табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Мідь, $f = 20$ кГц

D_1 , см	7	7	7	7
D_2 , см	0,8	0,85	0,87	0,9
k_n	8,75	8,24	8,05	7,78
S_2 , см ²	0,50	0,57	0,59	0,64
l , см	11,24	11,14	11,10	11,05

Таблиця 4.3. Мідь, $f = 24$ кГц

D_1 , см	7	7	7	7
D_2 , см	0,8	0,85	0,87	0,9
k_n	8,75	8,24	8,05	7,78
S_2 , см ²	0,50	0,57	0,59	0,64
l , см	9,37	9,28	9,21	9,25

Таблиця 4.4. Мідь, $f = 20$ кГц

D_1 , см	6	6	6	6
D_2 , см	0,8	0,85	0,87	0,9
k_n	7,5	7,06	6,9	6,67
S_2 , см ²	0,50	0,57	0,59	0,64
l , см	10,99	10,89	10,86	10,81

Таблиця 4.5. Мідь, $f = 24$ кГц

D_1 , см	6	6	6	6
D_2 , см	0,8	0,85	0,87	0,9
k_n	7,5	7,06	6,9	6,67
S_2 , см ²	0,50	0,57	0,59	0,64
l , см	9,16	9,08	9,05	9,0

Таблиця 4.6. Латунь $f = 20$ кГц

D_1 , см	7	7	7	7
D_2 , см	0,8	0,85	0,87	0,9
k_n	8,75	8,24	8,05	7,78
S_2 , см ²	0,50	0,57	0,59	0,64
l , см	10,03	9,94	9,9	9,85

Таблиця 4.7. Мідь, $f = 24$ кГц

D_1 , см	7	6,67	6,3	5,59
D_2 , см	0,87	0,83	0,78	0,69
k_n	8,05	8,04	8,08	8,10
S_2 , см ²	0,59	0,54	0,48	0,37
l , см	9,25	9,25	9,26	9,26

Рис. 4.7. Приклади варіювання параметрів концентратора (таблиці 4.2 – 4.7)

Примітка. Деякі відхилення числових величин у третьому та п'ятому рядках табл. 4.7 обумовлені лише округленням до сотих відповідних вхідних значень діаметрів D_1 та D_2 .

Під час реалізації описаних процедур використано той факт, що зростання діаметра D_2 призводить до пропорційного зменшення коефіцієнта підсилення амплітуди коливань та квадратичного збільшення площі S_2 .

Табл. 4.3, порівняно з попередньою, ілюструє вплив підвищення частоти f УЗГ на скорочення довжини l опрацьовуваного акустичного концентратора.

У табл. 4.4 показано можливість зменшення діаметра D_1 та довжини l за потреби меншої, ніж проаналізована вище, величини коефіцієнта k_n . Коли, наприклад, це значення $k_n = 7$, то в табл. 4.4, що розглядається, як конструктивні параметри концентратора варто обрати другий її стовпець. При неприйнятній довжині l доречно застосувати більшу робочу УЗ-частоту (див. табл. 4.5).

Вплив заміни матеріалу відтворює табл. 4.6. У табл. 4.7 показано варіювання діаметрами D_1 та D_2 при забезпеченні сталих значень коефіцієнта k_n підсилення амплітуди коливань A та довжини l опрацьовуваного концентратора.

Під час варіантного параметричного конструювання експонентного концентратора застосовувалась отримана на підставі залежності (4.9) формула

$$D_2 = \frac{D_1}{e^{\pi \sqrt{\left(\frac{2lf}{C}\right)^2 - 1}}}. \quad (4.10)$$

Вираз (4.10) засвідчує лінійний зв'язок між діаметрами D_1 і D_2 при сталому значенні частки добутку довжини l , частоти f та швидкості звуку C . Остання залежність може бути використана для забезпечення потрібного прогнозованого характеру змінювання конструктивних параметрів створюваного концентратора.

На рис. 4.8 наведено приклад візуалізації проаналізованого співвідношення.

Далі на засадах структурно-параметричного підходу, див. праці [9, 53, 73], окремі типи досліджуваних акустичних концентраторів об'єднуються у відповідну графову модель, яка дозволяє провести комплексну оптимізацію опрацьовуваного виробу під час його автоматизованого проектування завдяки наявним гнучким механізмам варіювання конструктивних параметрів.

Наостанок створюється твердотільна комп'ютерна геометрична модель акустичного концентратора та формується необхідний комплект технічної документації.

Для досягнення ефективного практичного впровадження варто реалізувати розглянуті прийоми та математичні засоби у вигляді певного зручного для кінцевого користувача спеціалізованого прикладного програмного забезпечення, наприклад, у середовищі таких відомих CAD/CAM/CAE (Computer-Aided Design, Computer-Aided Manufacturing, Computer-Aided Engineering) систем як, SolidWorks, CATIA, NX і т.д.

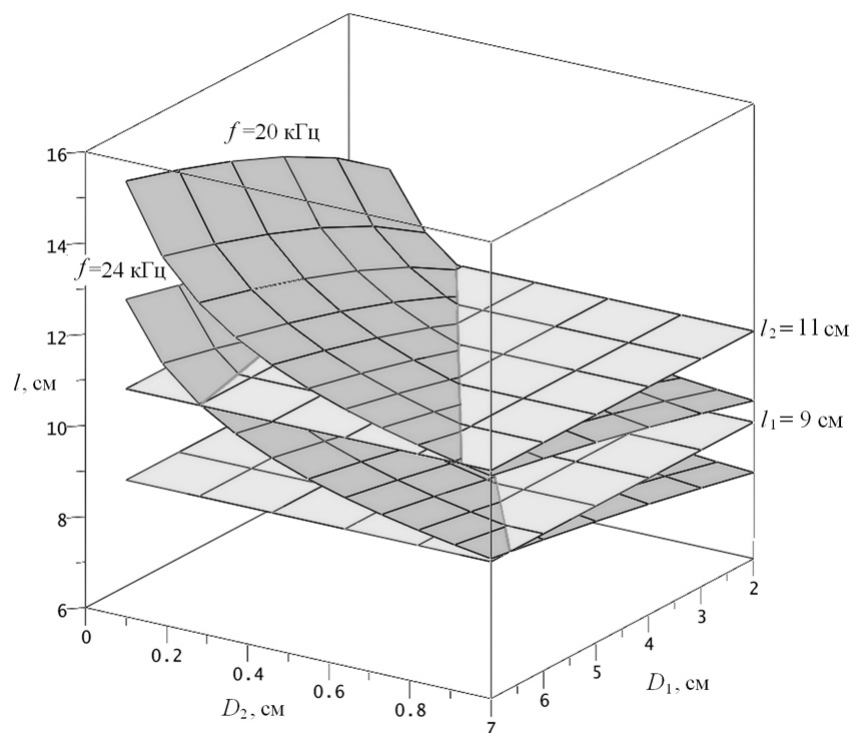


Рис. 4.8. Відтворення комп'ютерною геометричною моделлю залежності (4.10) для міді

При цьому слід забезпечити тісну безпосередню інтеграцію виконуваних варіантних розрахунків із відповідними комп'ютерними моделями конструкції, міцності та технології виробництва опрацьовуваних трансформаторів швидкості [70 – 78].

5. ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАЗОВОГО ПРОЦЕСУ «ВІЛЬНОГО» ПРОСОЧУВАННЯ ОРІЄНТОВАНИХ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ РІДКИМИ ПОЛІМЕРНИМИ ЗВ'ЯЗУЮЧИМИ

У цьому розділі розглядаються питання геометричного та комп'ютерного моделювання базового процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ПЗ. Геометричне моделювання здійснювалось з використанням апарату теорії інтегральної геометрії та геометричних ймовірностей при розв'язанні прикладної задачі, що стосується розподілу відстаней між суміжними колами (т.зв. довжин «екстхорд» кіл), розташованими у вузлах модельної подвійноперіодичної решітки, яка моделює структуру ОВН у КВМ, при їх перетині випадковою січною.

Розглянуто підхід до детермінування параметрів базової геометричної моделі структури ОВН, просоченого ЕС. Знайдено аналітичний вид функції розподілу довжин екстхорд кіл для окремого випадку. На підставі масиву замірів довжин екстхорд побудована експериментальна та модельні гістограми та отримано в аналітичному вигляді вираз для шуканої теоретичної кривої розподілу довжин екстхорд. Наведено математичні співвідношення для визначення структурних параметрів адекватної геометричної моделі ОВН та алгоритм прогнозування параметрів базового процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ПЗ [86 – 87].

5.1. Використання апарату теорії інтегральної геометрії та геометричних ймовірностей для геометричного моделювання мікроструктури орієнтованих волокнистих композитів

На сучасному етапі апарат теорії інтегральної геометрії та геометричних ймовірностей знаходить все більше застосування для вирішення ряду задач [88, 89]. Факти, що встановлюються цією теорією, лягають в основу напряму, що швидко розвивається, і який займається вивченням геометричних об'єктів випадкового характеру (випадкових точкових полів, випадкових прямих, випадкових мозаїк тощо), інваріантних відносно груп перетворень простору.

Значна кількість важливих задач у теорії геометричних ймовірностей пов'язана з опуклими фігурами, що перетинаються випадковими прямими. Фігури можуть мати загальну форму, бути або опуклими, або колами. Теорія геометричних ймовірностей використовує метод розміщення на досліджувану область випадкової прямої довжиною L , т. зв. січної, після чого вимірюються перетини з фігурами, що не мають спільних точок.

Слід зазначити, що теорія інтегральної геометрії та геометричних ймовірностей знаходить широкий діапазон застосувань у природознавстві і техніці. Так, наприклад, такі завдання виникають в екології (оцінка рослинного покриву або щільності ареалу, зокрема, дерев на тій чи іншій площі), у хімічній технології при аналізі колоїдних розчинів (розподіл розмірів часток, занурених у непрозоре середовище, за вимірюваннями сегментів, які виходять при

перетині цих частинок випадковими прямими шляхом зведення тривимірних вимірювань до двовимірних площинних), теоретичному вивченні пересувань опуклих об'єктів по транспортним артеріям у місті та в ряді інших випадків.

Не менш актуальним і цікавим як в теоретичному, так і в практичному планах є дослідження стохастичного розподілу волокон у структурі ОВН, що є армуючим елементом у КВМ. Такий інтерес обумовлений, в першу чергу, тим, що від характеру розподілу волокон у структурі ОВН (в рамках розгляду т.зв. структурного підходу) залежать як кінцеві властивості міцності затверділого композиту, так і прогнозовані технологічні параметри базового процесу «вільного» просочування ОВН рідким ПЗ [1].

Таким чином, рішення перерахованих вище завдань базується на дослідженні законів розподілу опуклих фігур, які перетинаються на площині випадковими січними. Повертаючись до розглянутого вище випадку ОВН, слід детально зупинитися на кількох моментах.

По-перше, для зручності та простоти подальших викладок слід прийняти форму волокон у поперечному перерізі односпрямованого КВМ круглою, що не буде являтися великою помилкою.

По-друге, на основі аналізу реальних шліфів поперечних перетинів затверділих КВМ на основі ЕС (див. рис.5.1), слід розглядати його геометричну структуру у вигляді безлічі кіл, ще не перетинаються [66, 86].

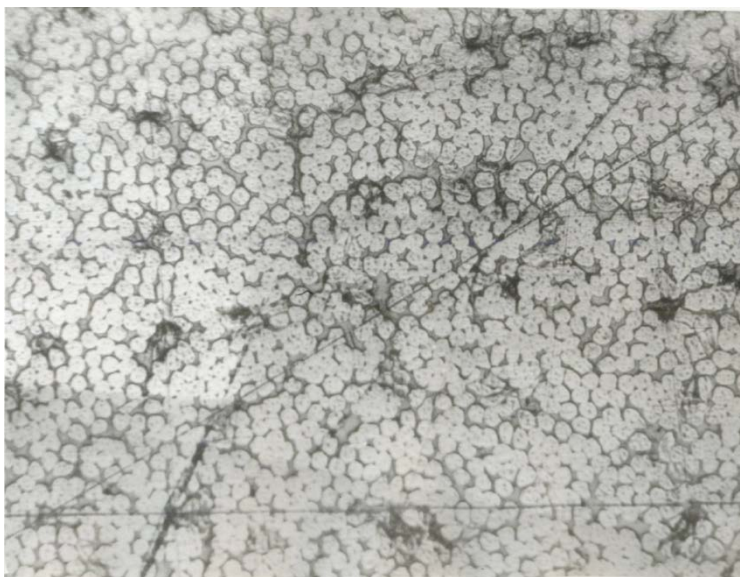


Рис. 5.1. Типова фотографія мікрошліфу поперечного перерізу затверділого КВМ у вигляді орієнтованого епоксидного органопластика.
Збільшення $\times 1200$

У даному конкретному випадку можна з великою часткою впевненості прийняти діаметри (радіуси) цих волокон такими, що не відрізняються один від

одного на скільки-небудь значну величину (що на практиці не перевищує в середньому 10%) внаслідок використовуваної фільєрної технології їх формування, при якій апіорі використовують фільєри одного діаметру [1].

По-третє, через особливості технологічного процесу «вільного» просочування [1], зокрема, стохастичності розподілу змотуваних з бобіни і надалі просочуваних рідким ПЗ пучків (джгутів, жмутів, ровінгів) орієнтованих волокон у просочувальній ванні при певному зусиллі натягнення, спостерігається стохастичність (випадковість) значень геометричних структурних параметрів упаковки цих волокон у перетині досліджуваного поперечного шліфа затверділого КВМ.

Останнє зумовлює необхідність застосування статистичних підходів до детермінування параметрів адекватної геометричної (структурної) моделі ОВН разом із застосуванням теорії випадкових (стохастичних) процесів.

По-четверте, особливістю геометричної структури розглянутого шліфа затверділого ОВН є переважно щільна упаковка волокон (циліндричних включень), що обумовлена технологією формування ОВН (див. рис. 5.1). Це, у свою чергу, зумовлює можливість апроксимації реальних геометричних структур ОВН регулярними структурами, зокрема, подвійноперіодичними. Останнє дає можливість у ряді випадків отримати аналітичні оцінки досліджуваних геометричних структурних параметрів моделі ОВН.

У роботі [65] були отримані аналітичні вирази для розподілу довжин хорд кіл для загального випадку подвійноперіодичних структур, а в роботах [66 – 67] були розглянуті загальні принципи побудови моделі структури в теорії армованих композиційних середовищ, а також досліджено деякі питання детермінування параметрів геометричної моделі структури ОВН, у т.ч. при проведенні натурного і чисельного експериментів.

Завдання розподілу довжин хорд кіл, що перетинаються січною, для одного і кінцевого числа кіл вирішувалася в роботі [90], а вплив параметрів розподілу вуглецевих волокон на їх механічні властивості в залежності від вигляду функції розподілу волокон по довжині досліджувався у роботі [91].

У той же час, для ряду технологічних завдань одержання КВМ на базі ОВН, крім знаходження розподілу довжин хорд кіл, є необхідним визначення відстаней між сусідніми (суміжними) модельними колами.

Такі залежності використовуються, наприклад, для прогнозування (проекування або попередньої оцінки) на їх основі технологічних параметрів, зокрема, для процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ПЗ та для інших задач. Останній аспект підкреслює актуальність застосування методології СПГМ досліджуваних об'єктів, зокрема, для вирішення конкретних технологічних завдань одержання орієнтованих КВМ, просочених ЕС.

Особливості моделювання геометричних параметрів адекватної геометричної (структурної) стохастичної моделі ОВН (тобто упаковки волокон) розглядаються нижче.

5.2. Геометрична модель мікроструктури орієнтованих композиційно-волокнистих матеріалів

Попередньо зробимо ряд зауважень щодо особливостей розміщення волокон (кіл) у поперечному перерізі (шліфі) затверділого ОВН, просоченого ЕК.

По-перше, з одного боку, теоретично прагнуть отримати граничну ступінь армування (вмісту циліндричних волокон) ξ_a в ОВН, тобто апріорі виходять з найбільш щільного геометричного упакування циліндрів як волокон. Це викликано суттєвими відмінностями (більш, ніж на порядок) властивостей міцності зв'язуючої полімерної матриці та армуючих волокон, які сприймають основне навантаження на орієнтований КВМ при його експлуатації [1, 86].

З іншого боку, вищевказана найбільш щільна (теоретична) укладка волокон практично неможлива і навіть вкрай небажана. Це обумовлено тим, що кожне волокно повинно бути оточено шаром полімерної матриці (рідкого зв'язуючого) для забезпечення найбільш високої адгезії поверхні волокон до полімерної матриці та отримання монолітності структури ОВН, а також конструкційних виробів на їх основі.

У зв'язку з цим на практиці застосовуються такі об'ємні ступені армування ξ_a при одержанні орієнтованих КВМ і виробів на їх основі з оптимальними фізико-механічними характеристиками: $\xi_a = \{0,6 - 0,75\}$ [1] – див. рис. 3.6.

За аналогією з роботами [65 – 67], в якості шуканої геометричної моделі середовища ОВН, просоченого ЕС, приймемо класичну геометричну модель українського вченого в галузі механіки орієнтованих композитів Г.А.Ваніна [15].

Остання представлена у вигляді системи циліндричних волокон, осі яких у загальному випадку паралельні і розташовані у вузлах подвійноперіодичної (регулярної) решітки паралелограмів, а простір між волокнами заповнений полімерною матрицею (зв'язуючим між волокнами середовищем). При цьому волокна (кола) не повинні накладатися одне на одного.

Елементарна базисна комірка (далі – ЕБК) такої геометричної моделі зображена на рис. 5.2.

В якості геометричних параметрів ЕБК, тобто параметрів упаковки волокон, вибрані довжини сторін ω_1 і ω_2 і кут між ними α , а в якості одиниці вимірювань у модельній площині (для зручності) прийнята базова сторона ЕБК ω_1 . При цьому у вузлах подвійноперіодичної решітки (ЕБК) розміщені кола радіуса r .

У загальному випадку ЕБК являє собою паралелограм (з кутом при вершині $\alpha = 60^\circ$), у вузлах якого розташовані кола одного радіуса r . Далі розглядаються питання, що стосуються підходів до визначення параметрів вищевказаної геометричної моделі структури ОВН.

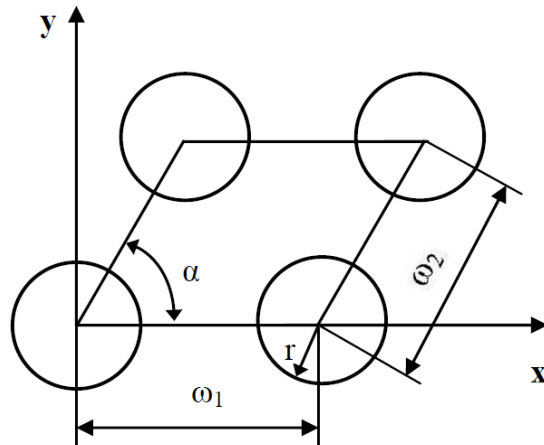


Рис. 5.2. Геометрична модель ЕБК адекватної структури поперечного шліфа затверділого ОВН, просоченого ЕС, що запропонована Г.А.Ванінін [15, 65–67]

5.2.1. Визначення параметрів геометричної моделі мікроструктури орієнтованих композиційно-волокнистих матеріалів

Для детермінування параметрів геометричної моделі структури вся площа поперечного шліфа досліджуваного ОВН (див. рис.5.1) моделюється шляхом подвійноперіодичного (тобто по вертикалі і по горизонталі) продовження ЕБК (див. рис. 5.3).

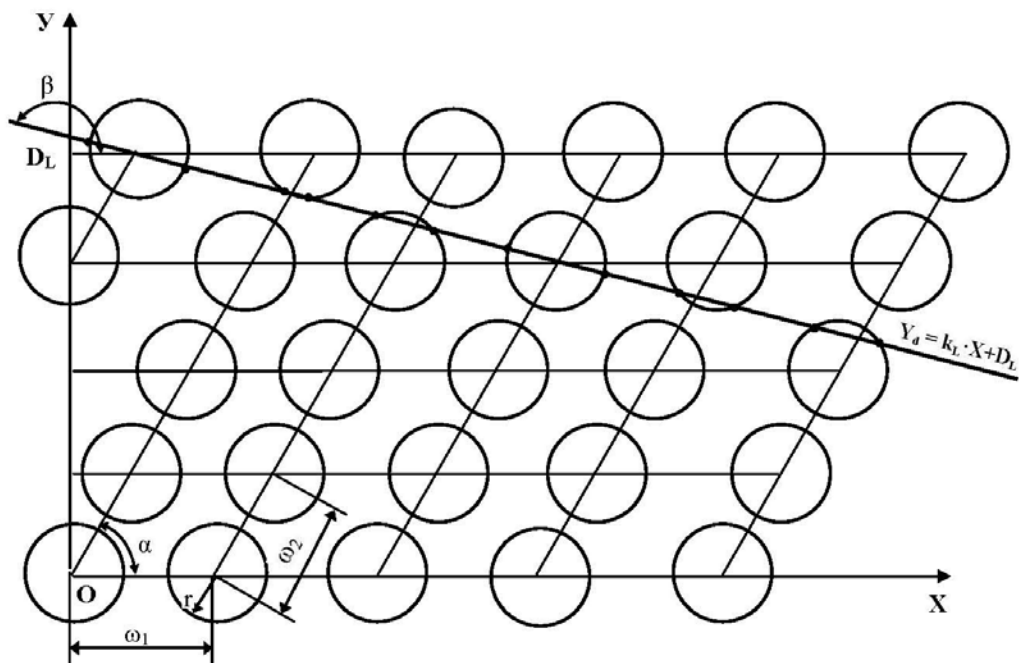


Рис. 5.3. Модельна решітчаста площа, отримана подвійноперіодичним продовженням ЕБК, і схема вимірів у ній відстаней між сусідніми вузловими колами при «киданні» випадкової січної $Y_d = k_L X + D_L$

Відзначимо, що в силу специфіки досліджуваного в дисертаційній роботі (технологічного) завдання нас буде цікавити переважно розподіл відстаней (довжин) між сусідніми волокнами (колами) в решітчастій площині, що моделює розміщення волокон у структурі поперечного шліфа ОВН.

Використання теорії інтегральної геометрії та геометричних ймовірностей [91, 92] для моделювання параметрів геометричної (структурної, фізичної) моделі ОВН, просочуваної рідким ПЗ, зводиться до наступного.

Є подвійноперіодична геометрична плоска модель у вигляді решітки, утворена на основі ЕБК, яка (для зручності і спрощення) являє собою паралелограм зі сторонами ω_1 і ω_2 і кутом між ними α , у вершинах (вузлах) якого розташовані кола радіуса r .

На цю модельну решітчасту площину «кидається» випадкова січна, уздовж якої детермінуються відстані між сусідніми колами (довжини т.зв. «екстхорд», або «зовнішніх хорд» кіл [67]).

На базі масиву замірів довжин екстхорд будується гістограма і визначається аналітичний вид шуканої кривої розподілу довжин екстхорд та її статистичні характеристики.

Далі проаналізуємо теоретичний розподіл довжин хорд і довжин екстхорд кіл у модельній решітчастій площині при їх перетині сімейством рівномірно розподілених прямих Π на площині \mathbb{R}^2 .

Зауважимо, що в такій ймовірнісній постановці в роботі [67] були отримані експериментальні розподіли довжин хорд і екстхорд волокон розглянутих ОВН, просочених ЕК.

Так, зокрема, модельні та експериментальні криві (функції) розподілів довжин хорд волокон (кіл) та їх екстхорд можуть аналітично апроксимуватись, зокрема, за допомогою універсального трипараметричного розподілу Г.А.Ваніна $P(x)$, що має δ -подібний характер, і визначений для додатніх значень випадкової змінної x [92]:

$$P(x) = \left(\frac{x}{\sigma\sqrt{2}} \right)^b \cdot \frac{\exp\left(-\frac{a_0^2}{2} - \frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \cdot sh\left(\frac{a_0 x}{\sigma}\right)}{a_0 \sigma \Gamma\left(1 + \frac{b_0}{2}\right) \cdot F\left(\frac{1-b_0}{2}, \frac{3}{2}, -\frac{a_0^2}{2}\right)}, \quad (5.1)$$

де $\sigma(x)$ – середньоквадратичне відхилення;

a_0 і b_0 – безрозмірні параметри, що встановлюються на основі обробки експериментальних даних;

$\Gamma(1 + b_0/2)$ – гамма-функція Ейлера;

$F[(1-b_0)/2, 3/2, -a_0^2/2]$ – вироджена гіпергеометрична функція Куммера [93].

Наведемо також формулу для визначення моменту порядку n випадкової величини x розподілу (3.1) [92]:

$$M(x^n) = (\sigma\sqrt{2})^n \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{b_0 + n}{2}\right) \cdot F\left(\frac{1 - b_0 - n}{2}, \frac{3}{2}, -\frac{a_0^2}{2}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{b_0}{2}\right) \cdot F\left(\frac{1 - b_0}{2}, \frac{3}{2}, -\frac{a_0^2}{2}\right)}, \quad (5.2)$$

Зауважимо, що окрім рівняння (5.1), можливі й інші аналітичні залежності для функції розподілу довжин екстхорд волокон, про що буде йти мова у розділі 6 роботи.

У розглянутій постановці задачі випадкова пряма L з сімейства Π перетинає безліч (сімейство) кіл системи F по безлічі хорд, причому довжини ρ відрізків прямої L (зауважимо, що розглядаються тільки скінченні значення довжин ρ), кінці яких лежать на колах системи F , не перетинаючись з ними, слугують прикладами шуканих екстхорд.

При цьому екстхорди символізують відстані між волокнами в розрізі ОВН (тобто в області, в якій розташована полімерна матриця). Причому довжини хорд і екстхорд кіл є випадковими величинами.

Нехай $g(r)$ – щільність розподілу радіусів r кіл вищевказаної модельної решітчастої системи F . Для неї був вибраний гамма-розподіл [92] як найбільш реальний розподіл для випадкового радіуса волокон у перетині затверділого ОВН, просоченого ЕС:

$$g(r) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda^{\alpha_0}}{\Gamma(\alpha_0)} \right) r^{\alpha_0-1} \cdot e^{-\lambda_0 r}, & r > 0, \\ 0, & r \leq 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

з параметрами

$$\alpha_0 = R_o^2/D_o, \lambda_0 = R_o/D_o,$$

де R_o – середній радіус волокон ОВН;

D_o – дисперсія відхилення від середнього випадкового радіусу r ;

$\Gamma(\alpha_0)$ – гамма-функція Ейлера.

Розглянемо тепер теоретичний розподіл довжин екстхорд кіл у модельній решітчастій площині при їх перетині сімейством рівномірно розподілених прямих Π на площині \mathbb{R}^2 . Нехай границі двох суміжних (замкнутих) фігур F_1 і F_2 (див. рис. 5.4), локально описуються в деякій системі координат Ox рівняннями $y = \varphi(x)$ і $y = \psi(x)$ відповідно.

І нехай випадкова пряма, що належить сімейству Π , паралельна осі Ox і перетинає фігури F_1 і F_2 точках $(a, \varphi(a))$ і $(b, \psi(b))$ – див. рис.5.4. При цьому $\varphi(a) = \psi(b)$, $b - a = z_0$.

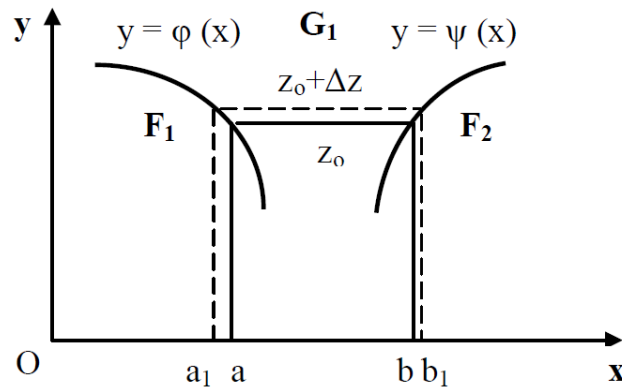


Рис. 5.4. Схема до обчислення функції розподілу довжин екстхорд для двох суміжних фігур F_1 і F_2

Обчислимо значення функції розподілу довжин екстхорд кіл $f_\rho(z)$. Нехай a_1, b_1 – такі точки на осі Ox , що

$$\varphi(a_1) = \psi(b_1), \quad b_1 - a_1 = (b - a) + \Delta z = z_0 + \Delta z,$$

де Δz – нескінченно мала величина – див. рис.5.4. Функції $\varphi(a)$ і $\psi(b)$ можна вважати нескінченно диференційованими. Розклавши їх в ряд Тейлора в околі точок a і b , отримаємо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} \varphi(a) = \psi(b), \\ \varphi(a_1) = \psi(b_1), \\ b_1 - b = a_1 - a + \Delta z, \\ \varphi(a_1) = \varphi(a) + \varphi'(a) \cdot (a_1 - a) + \frac{\varphi''(a)}{2} (a_1 - a)^2 + O(a_1 - a)^2, \\ \psi(b_1) = \psi(b) + \psi'(b) \cdot (b_1 - b) + \frac{\psi''(b)}{2} (b_1 - b)^2 + O(b_1 - b)^2 \end{cases} \quad (5.4)$$

За визначенням функції розподілу довжин екстхорд кіл $f_\rho(z)$ маємо:

$$f_\rho(z) = \frac{1}{|G|} \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\varphi(a_1) - \varphi(a)}{\Delta z}, \quad (3.5)$$

де $|G|$ – міра (довжина, площа) фігури G щодо сімейства Π .

Позначимо $\Delta a = a_1 - a$, $\Delta b = b_1 - b$. Прирівнявши четверте і п'яте рівняння в (5.4) з точністю до малих другого порядку, отримаємо:

$$\psi'(b) \cdot (\Delta a + \Delta z) = \varphi'(a) \cdot \Delta a, \quad (5.6)$$

звідки

$$\psi'(b) \cdot \Delta z = [\varphi'(a) - \psi'(b)] \cdot \Delta a; \quad \frac{\Delta a}{\Delta z} = \frac{\psi'(b)}{\varphi'(a) - \psi'(b)}. \quad (5.7)$$

Тому значення функції розподілу довжин екстхорд кіл $f_p(z)$ у точці z_0 дорівнює:

$$f_p(z_0) = \frac{1}{|G|} \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\varphi(a_1) - \varphi(a)}{\Delta z} = \frac{1}{|G|} \cdot \frac{\varphi'(a) \cdot \psi'(a + z_0)}{\varphi'(a) - \psi'(a + z_0)}, \quad (5.8)$$

де для ординати a виконується рівність:

$$\varphi(a) = \psi(a + z_0).$$

Значення функції розподілу довжин екстхорд кіл $f_p(z)$ в точці $b - a = z$, $z_0 = 0$, згідно (5.8), можна також переписати в наступному вигляді:

$$f_p(z) = k_1 \left[\frac{\varphi'(a) \cdot \psi'(b)}{\varphi'(a) - \psi'(b)} \right], \quad (5.9)$$

де k_1 – деякий нормуючий множник, що в загальному випадку не залежить від z .

З рівняння (5.8) ясно, що $f_p(z_0) = 0$, якщо $\varphi'(a) = 0$, або $\psi'(a + z_0) = 0$, і що $f_p(z_0) \rightarrow \infty$, якщо дотичні до кривих $y = \varphi(x)$ і $y = \psi(x)$ паралельні в точках $y = \varphi(a)$ і $y = \psi(a + z_0)$, тобто значення похідних дорівнюють нулю.

Зауважимо, що якщо графік функції $y = \psi(x)$ зсунути уздовж осі Ox на відстань Δ , то графік функції $f_p(z)$ зсунеться уздовж осі Oz на ту ж величину.

Графік функцій розподілів довжин екстхорд для різних взаєморозташувань двох кіл (див. рис. 5.5, а, б) має вигляд, показаний на рис. 5.5, в). Крива функції розподілу довжин екстхорд кіл має асимптоту в точці z_{\min} , в якій відстань між фігурами O_1 і O_2 уздовж прямої Π мінімальна, і значення функції дорівнює нулю в точках дотику до будь-якого з кіл O_1 або O_2 .

При цьому будь-яка область G_i , для якої потрібно обчислити розподіл довжин екстхорд кіл, може бути представлена як «обмеження» областей G_1 і G_2 (див. рис. 5.5, а, б) на деяких підвідрізках відрізків AB і CD , тобто тими частинами областей G_1 і G_2 , які розташовані над відповідними підвідрізками (відповідно AB і CD).

Функція розподілу довжин екстхорд кіл такої підобласті, що є «обмеженням» на підвідрізок, є з точністю до ненульового множника (який легко обчислюється) обмеженням функції для всієї області. Таким чином, функції розподілу довжин екстхорд кіл для областей G_i мають вигляд обмежень функції $f_p(z)$ (див. рис. 5.5, в) на певний відрізок $[z_{\min}, z_{\max}]$.

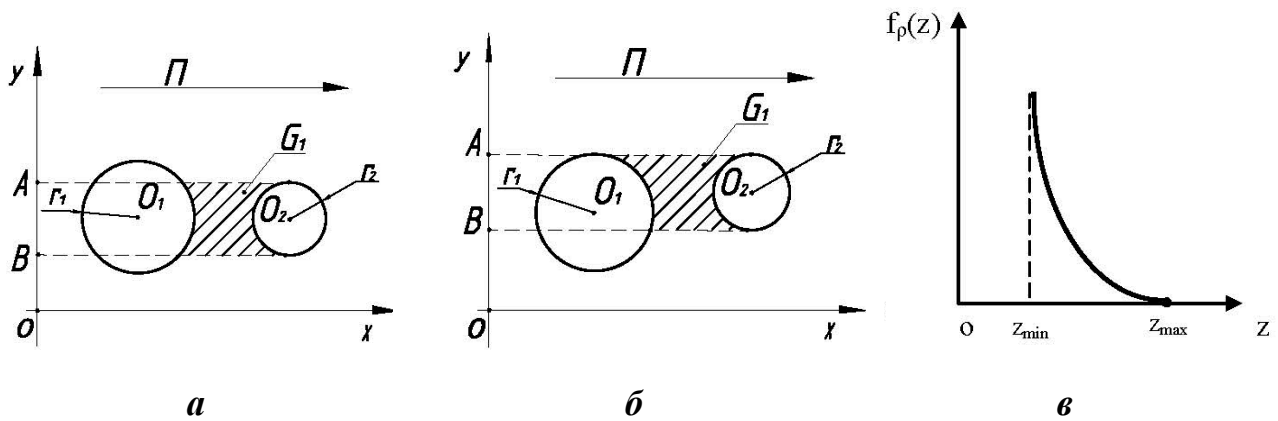


Рис. 5.5. Варіанти взаєморозташувань двох кіл O_1 і O_2 радіусів r_1 чи r_2 (а, б) та графік функцій розподілів довжин екстхорд $f_\rho(z)$ для різних взаєморозташувань двох кіл (в)

Локальне математичне очікування випадкової величини довжини екстхорди для кривих $y = \varphi(x)$ і $y = \psi(x)$, що дорівнює за визначенням

$$\int_{z_0}^{z_0+\Delta z} z f_\rho(z) dz, \quad (5.10)$$

є площа заштрихованої криволінійної трапеції з нормувальним коефіцієнтом $1/|G|$ (див. рис. 5.5, б). Тому для всієї фігури G отримаємо формулу:

$$M\rho_G = \int_G z f_\rho(z) dz = \frac{S_G}{|G|}, \quad (5.11)$$

де S_G – площа фігури G .

Ця формула отримана для фігур, які прямі Π перетинають не більше одного разу. Для більш складних фігур величина математичного очікування випадкової величини довжин екстхорди задовольняє наступній рівності:

$$M\rho = \sum_{i=1}^n \alpha_i M\rho_i = \frac{\sum_{i=1}^n S_{G_i}}{\sum_{i=1}^n |G_i|} = \frac{S_G}{\sum_{i=1}^n |G_i|}, \quad (5.12)$$

де $G = \bigcup G_i$ – таке розбиття, для якого міра вздовж Π фігур $G_i = \bigcap G_i$ дорівнює нулю для $i \neq j$. На відрізку $|G_i|$, який є проекцією фігури G_i уздовж Π

на вісь Oy , є також підвідрізок $|G|$. Тому якщо визначити на відрізку функцію $v : G \rightarrow \mathbb{N}$, що дорівнює в кожній точці числу екстхорд перетину прямої $g \in |G|$ з фігурою G , то

$$\sum_{i=1}^n |G_i| = \int_{|G|} v(g) dg \quad (5.13)$$

Отже, для будь-якої скінченної фігури G маємо формулу для математичного очікування довжин екстхорд кіл:

$$M\rho_G = \frac{S_G}{\int_{|G|} v(g) dg} \quad (5.14)$$

Для дослідження функції розподілу довжин екстхорд кіл у подвійноперіодичному випадку необхідно визначити деякі геометричні властивості решіток фігур для цього окремого випадку.

Будемо вважати, що двовимірна площина \mathbb{R}^2 забезпечена евклідовою метрикою. Нехай P – базисний паралелограм, суміжні сторони якого утворені векторами \vec{e}_1 і \vec{e}_2 , кут між якими дорівнює α . І нехай P – побудована по паралелограму P решітка, будь-яка точка (вузол) якої має вигляд $m\vec{e}_1 + n\vec{e}_2$, де m, n – довільні цілі числа ($m, n \in \mathbb{Z}$).

Нехай F_r – множина кіл радіуса $r > 0$ з центрами у вузлах решітки. Тоді можна показати, що будь-яка пряма на площині або перетинає нескінченне число кіл системи F_r (у цьому випадку довжини всіх екстхорд кіл на прямий є скінченими величинами), або не перетинає жодного кола системи F_r .

У моделі Г.А.Ваніна (див. рис. 5.2) система кіл F формується таким чином. Береться решітка F_r кіл з центрами у вузлах P . Будь-яке коло системи F утворюється подвійноперіодичним P -перенесенням (тобто перенесенням на вектор $m\vec{e}_1 + n\vec{e}_2$) деякого кола з центром у базисному паралелограмі P , причому ніякі два кола системи F не перетинаються.

Число кіл системи F , центри яких лежать у паралелограмі P , припускається скінченим. Тоді, будь-яка пряма p сімейства Π перетинає нескінченну множину $G \in \mathbb{R}^2$ або по нескінченному числу екстхорд, або цілком міститься в G . Множина прямих, що цілком містяться в G , утворює подвійноперіодичну $(k\vec{e}_1 + \ell\vec{e}_2)$ -підмножину множини G нескінченних смуг деякої ширини. Нас буде цікавити доповнення фігури G до цих смуг.

Позначимо через \hat{G} топологічне замикання доповнення до цих смуг. Розіб'ємо \hat{G} на нескінченну (злічену) кількість обмежених, зв'язних і однозв'язаних фігур G_i ($i = 1, 2, 3, \dots$). Будь-яка пряма сімейства Π перетинає

кожну з фігур G_i не більше, ніж по одній екстхорді фігури G (і якщо перетин не порожній, то таким перетином є саме екстхорда), причому довжина відрізка перетину повинна змінюватися неперервно всередині G_i . При цьому перетин $G_i = \bigcap G_j$ має Π -міру нуль (у розумінні $|G_i| = \bigcap |G_j| = 0$), і «розміри» G_i максимальні при виконанні вищевказаних умов.

Множину G_i можна конструктивно описати так. Будь-яка точка $x \in \hat{G}$ буде належати деякій множині G_i . Проведемо через x пряму $q \in \Pi$. Очевидно, що точка x належатиме деякій екстхорді з $q \cap \hat{G}$. Варіюючи пряму q у сімействі Π так, щоб довжина цієї екстхорди змінювалася неперервно, в якості фігури, що містить точку x , виберемо об'єднання екстхорд, що безперервно змінюються.

Очевидно, що граничні екстхорди фігури G_i є дотичними до деяких кіл системи F . Якщо точка x була вибрана таким чином, що екстхорда $q \cap \hat{G} \ni x$ є дотичною до деякого кола, то фігура G , що містить x , лежить на границях цих фігур (але це на побудову фігур G_i особливого впливу не має).

Таким чином, ми визначили розбиття

$$|\hat{G}| = \bigcup_{i=1}^{\infty} G_i$$

яке задовольняє вищенаведеним умовам. Можна довести, що кількість різних типів фігур у розбитті скінченна. Якщо взяти представника кожного типу, то набір представників можна розбити на частини і $(k\vec{e}_1 + \ell\vec{e}_2)$ -перенесенням «замостити» без накладень фігуру $\hat{G} \cap P$.

Залишається додати, що для достатньо великих a і b в області $\hat{G} \cap \Phi(a, b)$, де $\Phi(a, b)$ – прямокутник зі сторонами a і b , паралельними осям координат, частота входження до кожної з фігур представників різних типів одна і та сама.

Це показує, що в границі при $a, b \rightarrow \infty$ функція розподілу довжин екстхорд кіл подвійноперіодичної системи кіл на площині є лінійною комбінацією функцій типу $f_p(z)$, представлених на рис.5.5,в (тобто її графік має вигляд, представлений на рис. 5.7 – див. далі, що узгоджується з результатами чисельного експерименту роботи [67]). Це дає повну картину («портрет») поведінки гістограм розподілу довжин екстхорд кіл для подвійноперіодичних детермінованих моделей.

Вище було відзначено, що функцію розподілу довжин екстхорд кіл $f_p(z)$ у загальному випадку обчислити вкрай важко. Тому пропонується спрощений варіант обчислення цієї функції, який дозволяє описати її поведінку в околі нуля, тобто в найбільш вірогідній області довжин екстхорд реальної структури ОВН при оптимальній упаковці волокон (див. рис. 5.1).

Аналіз загальної ситуації (див. рис. 5.1) дозволяє зробити висновок про те, що «внесок» цього окремого випадку в загальну картину матиме найбільшу вагу. Тому подібна апроксимація функцією розподілу $f_p(z)$ загальної функції розподілу, теоретично знайденої для окремого випадку, буде цілком виправдана.

Вище було відзначено, що щільність розподілу радіусів r кіл за гамма-законом (5.3) системи F адекватно описує розподіл довжин хорд волокон. У свою чергу, розподіл довжин екстхорд волокон істотно залежить від розташування центрів кіл. Нехай тепер P – ромб з кутом $\alpha = 60^\circ$, а F – система кіл, що не перетинаються, з центрами у вузлах P решітки P і радіусами, розподіленими за гамма-законом (5.2).

Тобто в розглянутій спрощеній моделі центри кіл збігаються з вузлами гексагональної решітки паралелограмів на площині (сторони паралелограмів є рівні, тобто $\omega_1 = \omega_2$). Зауважимо, що в цьому випадку така подвійноперіодична решітка кіл володіє максимальною анізотропією серед усіх подвійноперіодичних решіток паралелограмів [66].

Також зробимо деякі спрощення. Нехай прями сімейства Π паралельні стороні решітки P . Функцію розподілу довжин екстхорд кіл $f_p(z)$ визначимо тільки для двох кіл системи F з радіусами r_1 і r_2 , центри яких лежать у сусідніх вузлах решітки P (див. рис. 5.6).

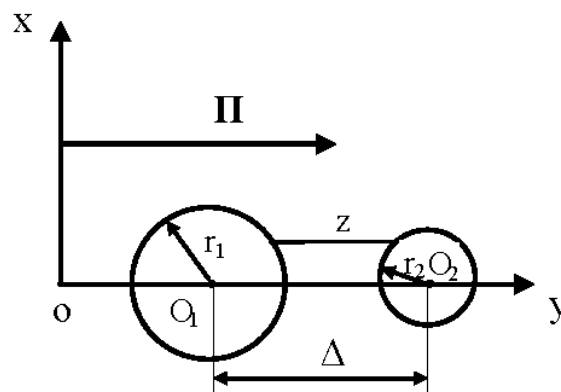


Рис. 5.6. До отримання функції розподілу екстхорд кіл для випадку розташування двох кіл радіусів r_1 і r_2 , що перетинаються прямими, паралельними одній зі сторін решітки ЕБК

Нехай Δ – відстань між центрами кіл r_1 і r_2 , причому $r_1 + r_2 \leq \Delta$, де Δ – довжина сторони паралелограма, вибрана таким чином, щоб мінімізувати відхилення функції розподілу довжин екстхорд аналітичної залежності для геометричної моделі та експериментальної гістограми розподілу довжин екстхорд волокон у структурі поперечного шліфа ОВН.

І нехай сімейство випадкових прямих Π паралельне лінії центрів кіл з радіусами r_1 і r_2 та висікає випадкові екстхорди випадкової довжини z (див. рис. 5.7). Позначимо $\zeta = \Delta - z$. Тоді, використовуючи (5.4), щільність розподілу $q(r_1, r_2, z)$ довжин екстхорд кіл радіусів r_1 і r_2 прийме наступний вигляд:

$$q(r_1, r_2, z_0) = k_2 \frac{\zeta^4 (r_1^2 - r_2^2)^2}{\sqrt{[(r_1^2 + r_2^2) - \zeta^2] \cdot [\zeta^2 - (r_1 - r_2)^2]}}, \quad (5.15)$$

де $k_2 = 1/\min(2r_1, 2r_2)$.

Нехай тепер радіуси r_1 і r_2 – випадкові та розподілені за законом (5.3), причому також виконується умова неперетинання: $r_1 + r_2 \leq \Delta$. Тоді аналітичний вид функції розподілу довжин екстхорд кіл $f_\Delta(z)$ матиме наступний вигляд:

$$f_\Delta(z) = \frac{\lambda^{2\alpha_0}}{\Gamma^2(\alpha_0)} \iint_{\Omega(r_1, r_2)} \frac{[(\Delta - z)^4 - (r_1^2 - r_2^2)^2] (r_1 \cdot r_1)^{\alpha_0 - 1} \cdot e^{-\lambda_0(r_1 + r_2)}}{r_1 \sqrt{[(r_1^2 + r_2^2) - (\Delta - z)^2] \cdot [(\Delta - z)^2 - (r_1^2 - r_2^2)]}} dr_1 dr_2, \quad (5.16)$$

де $\Omega(r_1, r_2)$ – область інтегрування, яка визначається системою нерівностей:

$$0 \leq r_1 \leq r_2; \Delta \geq r_1 + r_2 \geq \Delta - z; r_2^2 - r_1^2 \geq (\Delta - z)^2.$$

Рівняння (5.16) вирішується чисельними методами. Характер поведінки функції $f_\Delta(z)$, де $\Delta = 2R_0 + \delta_0$, а $\delta_0 = 0, \pm 0,1, \pm 0,2, \pm 0,3, \dots, \pm 1$, показано на рис. 5.7.

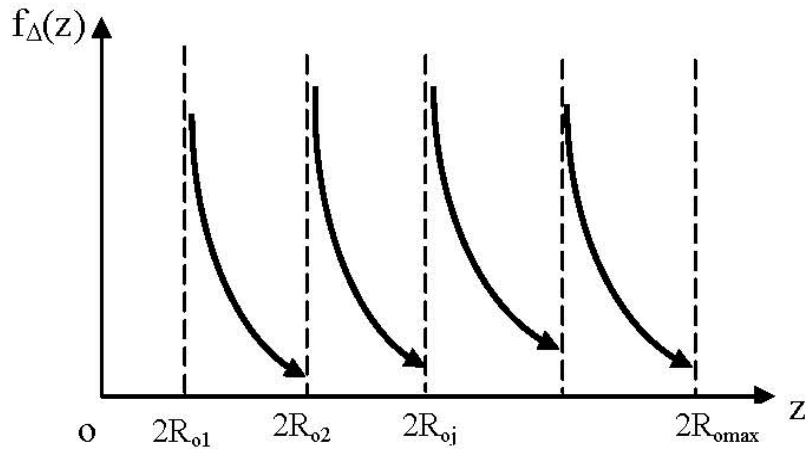


Рис. 5.7. Функція спільної щільності розподілу довжин екстхорд кіл $f_\Delta(z)$ (5.16) множини кіл, що не перетинаються.

На рис. 5.7 стрілками позначені розриви функції $f_\Delta(z)$ в розташованих у порядку зростання вертикальних асимптотах $z_i = 2R_{0i} + \delta_0$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Функція $f_\Delta(z)$ має явно виражений пік при наближенні зліва до вертикальної асимптоти ($2R_0 + \delta_0$), а праворуч від неї функція $f_\Delta(z)$ різко зменшується до нуля. Точки $2R_{0i}$ є точками розриву функції $f_\Delta(z)$, в яких значення цієї функції дорівнює нескінченності.

5.3. Порівняння результатів експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання розподілу довжин екстхорд

У Додатку Е наведені деякі співвідношення, що використовувались при проведенні комп'ютерного моделювання з детермінування розподілу відстаней між сусідніми колами в модельній решітчастій площині відповідно до підходу [59]. Ці результати використовувались для побудови геометричної моделі ОВН.

На рис. 5.8 показані: експериментальна гістограма розподілу екстхорд волокон для орієнтованого КВМ на основі органоволокна СВМ (див. рис. 5.1), теоретичні (5.16), а також модельні (тобто отримані в результаті чисельного експерименту) криві розподілу довжин екстхорд суміжних волокон (кіл) $f_{\Delta}(z)$.

За отриманими експериментальними ординатами (\circ) гістограми розподілу довжин екстхорд суміжних волокон проводиться теоретична крива, наприклад трипараметричного розподілу Г.А.Ваніна (5.1), або крива (5.16), а також модельна крива з урахуванням найменшого відхилення від експериментальних ординат (\circ) [69]. Причому в загальному випадку вищевказані криві розподілу $f_{\Delta}(z)$ не повинні «гладко» проходити через усі експериментальні ординати (\circ).

Було встановлено, що при заданих параметрах $\alpha_0 = R_0^2/D_0 = 8$, $\lambda_0 = R_0/D_0 = 1$, де R_0 – середній радіус волокон ОВН, а D_0 – дисперсія відхилення від середнього випадкового радіусу r , оптимальне значення Δ , при якому функція розподілу довжин екстхорд суміжних кіл $f_{\Delta}(z)$ (5.16) найбільш близька до експериментальної гістограми довжин суміжних екстхорд волокон (див. рис. 5.10), досягається при $\Delta = 12,7$.

Вищевказані підходи методології теорії інтегральної геометрії і геометричних ймовірностей та отримані результати можуть використовуватись для моделювання технологічних параметрів процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ПЗ на стадії конструкторсько-технологічного проектування [27].

Не менш актуальним і цікавим як в теоретичному, так і в практичному планах є дослідження стохастичного розподілу волокон у структурі орієнтованого КВМ для прогнозування його напружено-деформованого стану [15]. Проте цей напрямок не є темою досліджень навчального посібника.

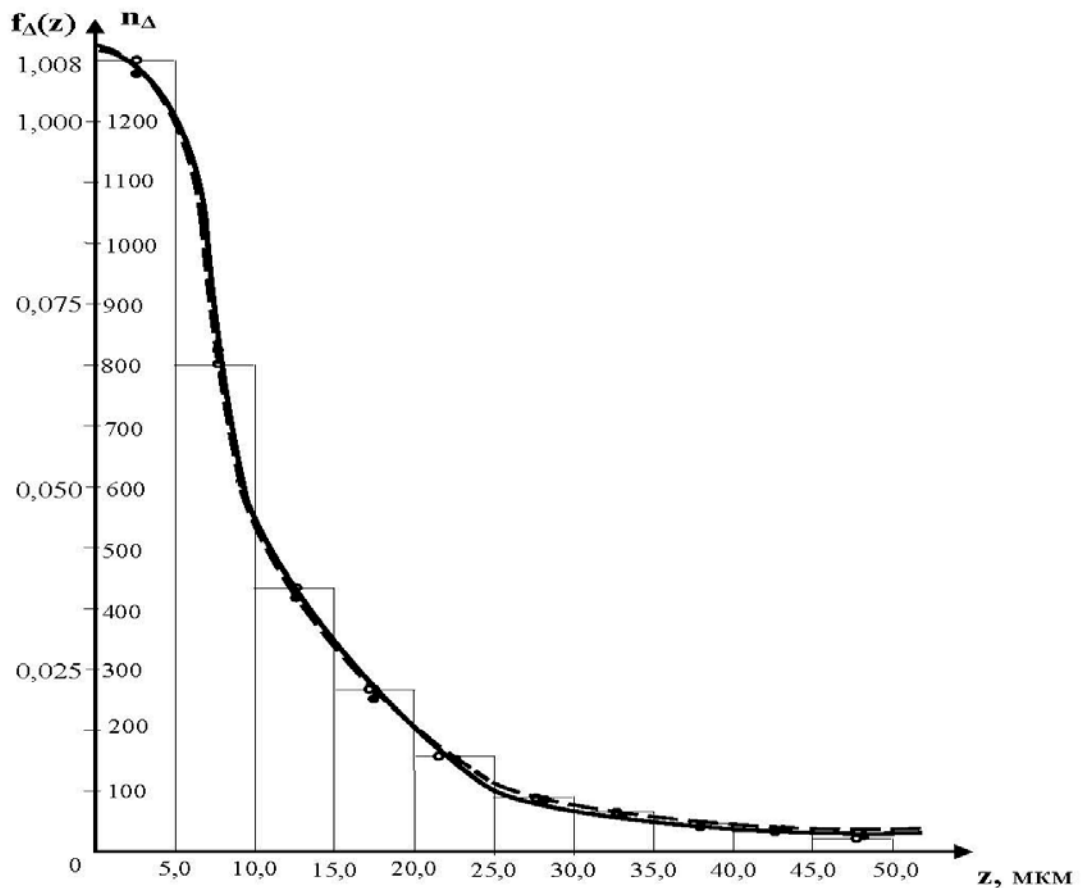


Рис. 5.8. Гістограма та криві розподілу довжин екстхорд суміжних волокон (кіл):

(○) – експериментальні ординати при зусиллі натягнення на одну нитку органоджгута $N = 0,3$ Н/м;

(●) — теоретичний розподіл $f_{\Delta}(z)$ (5.16);

(— —) – модельні криві розподілу довжин екстхорд суміжних волокон (кіл), отримані шляхом проведення комп'ютерного моделювання;

n_{Δ} – кількість замірів

5.4. Комп'ютерне моделювання базового процесу «вільного» просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими

Послідовність припущень при комп'ютерному моделюванні базового процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ПЗ, що схематично наведена на рис. 5.9 (а – д), та побудові алгоритму для його реалізації, згідно [68, 69], полягає в наступному.

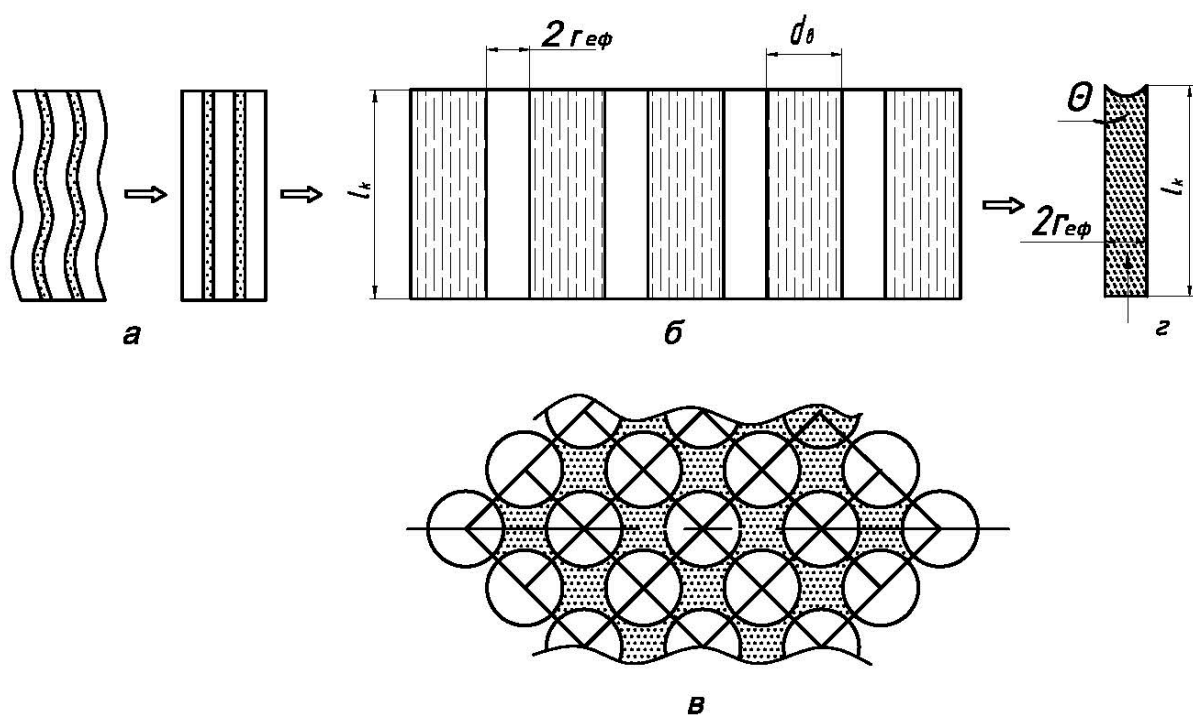


Рис. 5.9. Ілюстрація методики побудови (а – д) адекватної геометричної моделі мікроструктури ОВН у технології їх «вільного» просочування рідким ЕЗ:

r_{ef} – ефективний капілярний радіус;
 d_0 – середній діаметр волокна;
 θ – крайовий кут змочування

Від структури ОВН, що у загальному випадку складається із системи паралельно-звивистих капілярів різних радіусів (рис. 5.9, а), яку можна детермінувати за допомогою функції розподілу капілярних пор радіусом ρ за розмірами $\varphi(\rho)$, переходять за допомогою аналітичних співвідношень, що розглядаються нижче, до усереднення геометричної моделі структури ОВН як регулярної структури лінійних капілярів з однаковим поздовжнім перетином (рис. 5.9, б).

Схема заповнення ОВН просочувальною рідиною (ЕЗ) показана на рис. 5.9, в і на рис. 5.9, г (поперечний переріз ОВН, просочених рідкими ЕЗ). Тобто в підсумку переходять до схеми просочування одиночного еквівалентного капіляру довжиною l_k (рис. 5.9, д), діаметр якого дорівнює $2r_{ef}$ [127, 138].

5.4.1. Математичні співвідношення для визначення структурних параметрів адекватної геометричної моделі орієнтованих волокнистих наповнювачів

Відомо, що базовим питанням при детермінуванні параметрів модельного кінетичного рівняння процесу «вільного» просочування [30, 69], що характеризує залежність між часом, висотою чи швидкістю просочування й структурними параметрами просочуваних капілярно-пористих тіл та технологічними властивостями просочувальної рідини, є коректне знаходження структурних характеристик геометричної моделі просочуваних ОВН (у вигляді еквівалентного циліндра), на основі яких отримують це рівняння.

В якості останніх приймають пористість ε , питому внутрішню поверхню S_{num} та ефективний (гідравлічний) капілярний радіус r_{ef} того чи іншого типу використовуваного для просочування ОВН, як капілярно-пористого тіла [68, 69].

При побудові геометричної (фізичної) моделі структури ОВН є доцільним використання структурного підходу (а саме мікроструктурного аналізу перетину композиту на основі ОВН, просоченого рідким ПЗ) для визначення шуканих параметрів, зокрема, ефективного (гідравлічного) капілярного радіуса r_{ef} еквівалентного циліндричного капіляра.

Найбільш адекватним поданням мікроструктури ОВН на базі регулярно розташованих у його перетині волокон є структура капілярно-пористого тіла. Остання у загальному випадку складається із системи паралельно-звивистих капілярів різних радіусів, яку для випадкової величини розподілу капілярів у перетині КВМ можна адекватно описати за допомогою функції розподілу пор радіусу ρ за розмірами $\varphi(\rho)$ [28, 30].

Відповідно до використаного підходу (див. підрозділ 5.1), після затвердіння, за визначеного зусилля натягнення N просоченого ОВН, роблять мікрошліф його перетину у поперечному до волокон напрямі. Далі у перетині мікрошліфу експериментально досліджують розподіл довжин екстхорд волокон, або функцію розподілу $\varphi(\rho) = G(\ell)$ випадкових пор за розмірами ℓ .

Таким чином, екстхорди символізують відстані між суміжними волокнами в перерізі КВМ, або, як у нашому випадку, еквівалентний (ефективний) діаметр (чи подвійний радіус r_{ef}) пор, причому довжини екстхорд є випадковими.

Детермінацію теоретичної (модельної) кривої розподілу $\varphi(\rho) = G(\ell)$ пор за розмірами проводять за умови найкращого наближення (тобто мінімального відхилення) теоретичної чи модельної кривої розподілу до експериментальної кривої розподілу. Надалі, відповідно до окресленого підходу, за допомогою знайденої функції розподілу довжин екстхорд $\varphi(\rho) = G(\ell)$ обчислюють пористість ε , питому внутрішню поверхню S_{num} та ефективний (або еквівалентний) капілярний радіус r_{ef} шуканого ОВН як капілярно-пористого тіла [30, 141].

Пористість ε у капілярно-пористому тілі, наприклад, згідно [30], визначається наступним чином:

$$\varepsilon = N^0 \pi \beta_o \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho = \frac{N^0 \pi \beta_o \bar{\rho}^2}{4} = \frac{N^0 \pi \beta_o}{4} \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho, \quad (5.17)$$

де N^0 – кількість замірів поміж суміжними волокнами у площині шліфу затверділого композиту.

У свою чергу, питому внутрішню поверхню S_{num} можна визначити як [30]:

$$S_{num} = k_o N^0 \pi \beta_o \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho = \kappa_o N^0 \pi \beta_o \bar{\rho}, \quad (5.18)$$

де $\bar{\rho}$ – середній радіус пор, а коефіцієнти κ_o і β_o можна трактувати як поправочні коефіцієнти, що враховують властивості структури ОВН як капілярно-пористого середовища (і які означають відповідно шорсткість поверхні і звивистість еквівалентного циліндричного капіляра).

Якщо прийняти, як і в роботах [30, 128], в якості ефективного (або еквівалентного капілярного радіуса) r_{ef} шуканого ОВН гідралічний радіус, який визначається за аналогією з «ідеальним» циліндричним капіляром як відношення подвоєного об'єму пор до їх питомої внутрішньої поверхні, то отримаємо:

$$r_{ef} = \frac{2\varepsilon}{S_{num}} = \frac{2}{\kappa_o} \left[\int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho / \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho \right]. \quad (5.19)$$

Рівняння (5.17) – (5.19) повністю визначають комплекс структурних характеристик геометричної моделі ОВН, просочуваного рідкою ЕК, а саме пористість ε , питому внутрішню поверхню S_{num} та ефективний (гідралічний) капілярний радіус r_{ef} .

5.4.2. Методика моделювання параметрів базового процесу «вільного» просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими

Один з головних модельних параметрів базового процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ПЗ, а саме час поздовжнього просочування t , відповідно до [27, 128, 137-138], виражається таким чином:

$$t = \frac{\eta h^2}{2\sigma \cos \theta r_{ef}}. \quad (5.20)$$

З рівняння (5.20) можна також знайти диференціюванням значення ефективного радіуса пор r_{ef} [27, 128, 137–138]:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{r_{ef} \sigma \cos \theta}{4\eta h}. \quad (5.21)$$

Методика та побудований на її основі алгоритм моделювання параметрів базового процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ПЗ реалізується у послідовності чотирьох етапів.

I етап – вибір адекватної геометричної моделі мікроструктури ОВН (див. рис. 5.2).

II етап – знаходження функцій розподілу екстхорд волокон геометричної моделі мікроструктури ОВН, наприклад, у вигляді (5.16) або в іншому вигляді $\varphi(\rho) = G(\ell)$, і структури натурального шліфу КВМ з урахуванням зусилля натягнення N ОВН при просочуванні та за умови їх припустимого відхилення одна від одної.

III етап – визначення на базі функції розподілу екстхорд волокон структурних характеристик геометричної моделі мікроструктури ОВН як капілярно-пористого тіла (пористості ε , питомої внутрішньої поверхні S_{int} , ефективного капілярного радіуса r_{ef}) відповідно до залежностей (5.17) – (5.19).

IV етап – моделювання кінетики базового процесу «вільного» просочення з урахуванням залежностей (5.20) – (5.21) та комп'ютерна візуалізація отриманих модельних кінетичних кривих.

Вищезазначений алгоритм моделювання параметрів базового процесу «вільного» просочування рідкими ПЗ з урахуванням наперед заданих початкових умов (зусилля натягнення N ОВН, що відповідно впливає на параметри адекватної геометричної моделі мікроструктури ОВН) був реалізований у програмному середовищі Excel.

6. ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДЕНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДОЗУЮЧОГО КАВІТАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ З ПРЯМОКУТНОЮ ВИПРОМІНЮЮЧОЮ ПЛАСТИНОЮ

У цьому розділі розглядаються: розроблена методика варіантного структурно-параметричного геометричного конструювання складеного дозуючого кавітаційного пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною, деякі результати проведеної конструкторсько-технологічної параметричної оптимізації досліджуваного дозуючого пристрою, питання комп'ютерного варіантного тривимірного (3D) конструювання УЗ-досліджуваного пристрою з візуалізацією отриманих результатів у середовищі системи автоматизованого проектування Компас-3D [51, 141].

Зазначений дозуючий пристрій використовується, зокрема, в технології одержання тканих реактопластичних КВМ.

6.1. Схема розміщення елементів складеного ультразвукового дозуючого кавітаційного пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною

У розділі 2 було зазначено, що в реальних випромінюючих системах має місце нерівномірність поля згинального випромінювача, яка може бути зменшена раціональним вибором типу випромінювача УЗ, геометричних параметрів випромінюючої пластини, наприклад її товщини, а також упорядкуванням розташування випромінювачів один щодо одного і щодо оброблюваного об'єкта (рідкого полімерного середовища чи просочуваної склотканини).

Вищевикладені чинники зумовлюють напрямки досліджень при розробленні відповідної методики розрахунку таких коливальних систем на основі плоскої випромінюючої пластини та геометричної оптимізації складаючих конструктивних елементів УЗ-дозуючого пристрою [61, 138, 141].

Підведення акустичної енергії до дозуючого кавітаційного апарату на основі випромінюючої пластини 1 (див. рис. 6.1) здійснювали за допомогою ПЕП 5, які фіксували впритул до пластини за допомогою різьбового з'єднання і зварювання.

Уздовж (див. рис. 6.2) і впоперек (див. рис. 6.1) випромінюючої пластини 1 регулярно розміщували декілька секцій з випромінювачами УЗ, що давало можливість забезпечити необхідну площу випромінюючої поверхні пластини 1 (див. рис. 6.2).

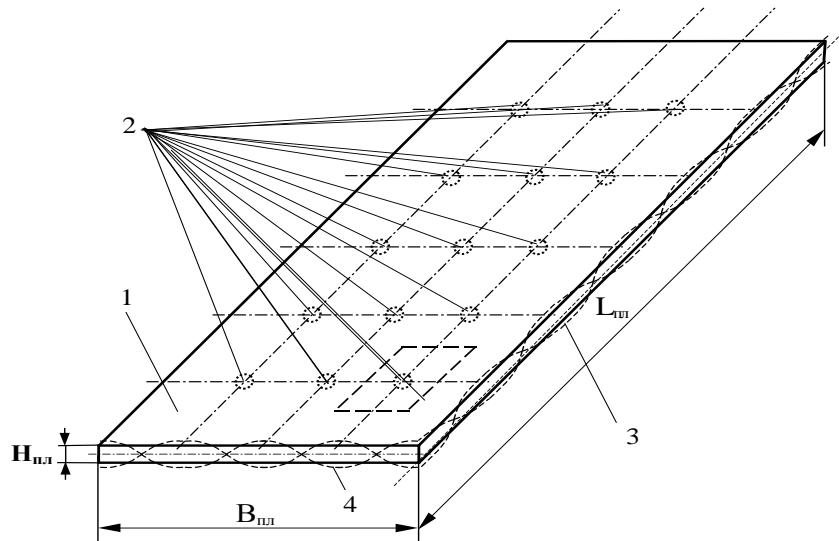


Рис. 6.1. Схема регулярного розміщення УЗ-вібраторів на нижній поверхні робочої випромінюючої пластини, що здійснює резонансні згинальні коливання (пунктирною лінією позначені границі подібної ділянки пластини з елементами її кріплення до вібратора УЗК) [61, 138, 141]:

- 1 – випромінююча пластина;
- 2 – місця кріплення УЗ-вібраторів на нижній поверхні робочої випромінюючої пластини;
- 3 – хвилі згинальних коливань по довжині $L_{пл}$ пластини;
- 4 – хвилі згинальних коливань по ширині $B_{пл}$ пластини

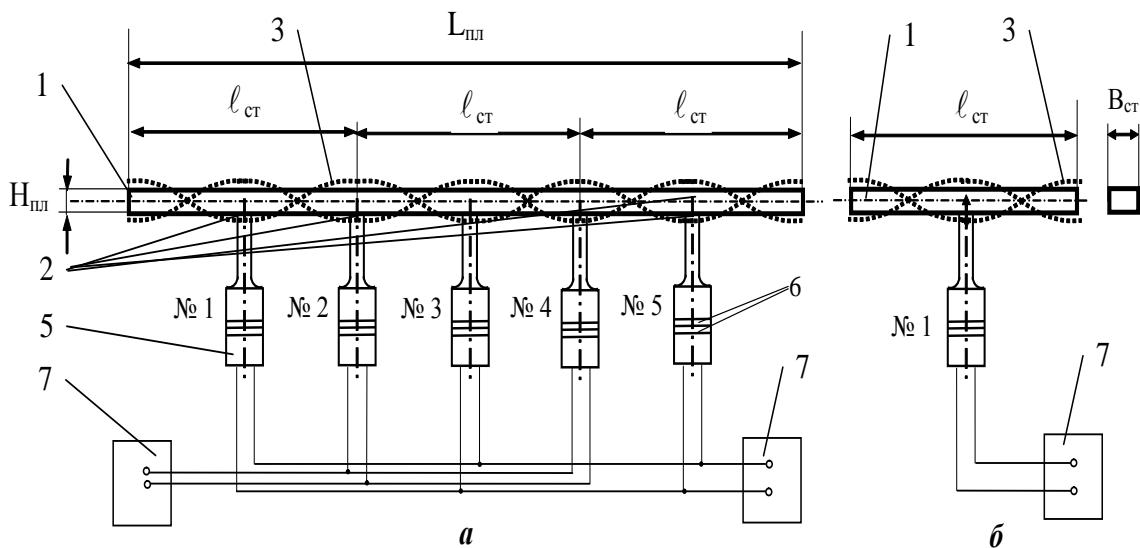
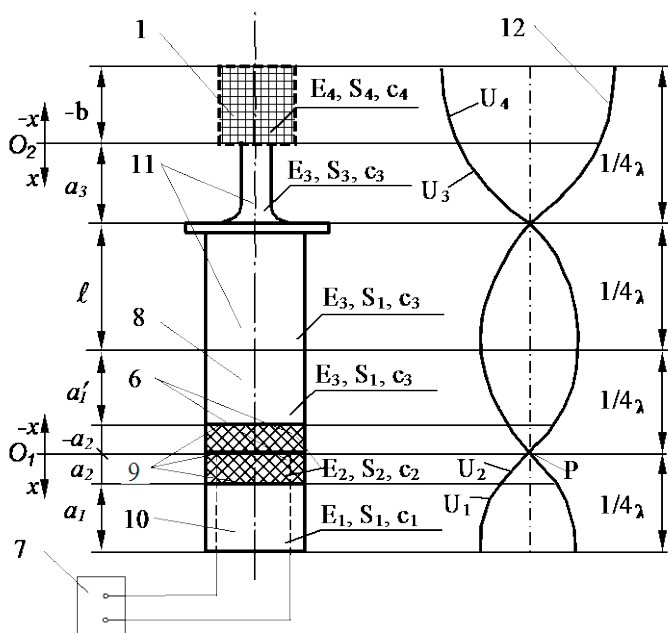


Рис. 6.2. Послідовність розміщення й підключення УЗ-вібраторів, зібраних на складених ПЕП, на нижній частині випромінюючої пластини по її довжині (а) і на стрижні (хвилеводі) шириною $B_{ст}$, що здійснюють згинальні коливання (б) [61, 138, 141]:

- 1 – випромінююча пластина (чи стрижень);
- 2 – місця кріплення УЗ-вібраторів на нижній поверхні робочої випромінюючої пластини;
- 3 – хвилі згинальних коливань;
- 5 – УЗ-вібратори (№№ 1–5), що зібрані на базі ПЕП 6; 7 – УЗГ

Задіяні в кавітаційному апараті випромінювачі УЗ були зібрані за схемою однохвильової акустичної системи (рис. 6.3). Джерелом УЗК був складений ПЕП, зібраний з двох встановлених послідовно п'єзокілець 6, підключених паралельно до УЗГ 7. Необхідне значення резонансної частоти коливань ПЕП досягається вибором акустичних розмірів і властивостей матеріалу демпфера 10 і 8 і трансформатора швидкості 11.



l – випромінюючий циліндр еквівалентного перетину (D_l);

 $7 - \text{Y3}\Gamma;$

9 – електроди товщиною 0,2–0,3 мм (D_9);

12 – хвиля поздовжніх коливань довжиною λ

6.2. Удосконалена методика та алгоритм варіантного структурно-параметричного геометричного конструювання складеного ультразвукового дозуючого пристрою

У підрозділі 3.3.3 були концептуально розглянуті основні аспекти СПГМ (формоутворювальних елементів) УЗ-дозуючого пристрою, що входить в блок дозування ІІІ полімерного зв'язуючого на просочений волокнистий матеріал – це блок *Д* (див. рис.1.1), фрагмент якого показаний на рис. 6.4.

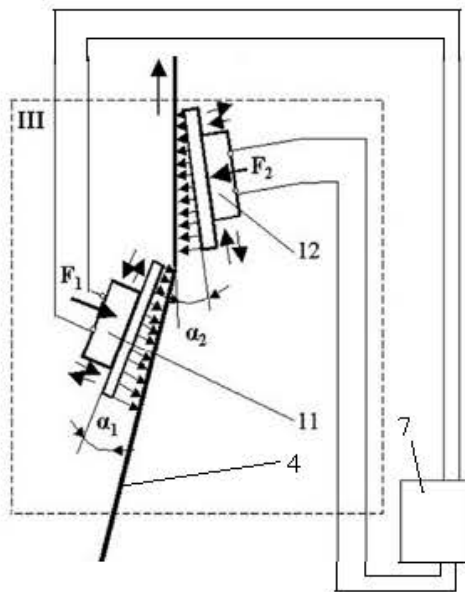


Рис. 6.4. Фрагмент блоку дозування *Д*, показаного на рис. 3.1:

4 – довгомірний волокнистий матеріал;

11, 12 – пара робочих УЗ-інструментів (випромінюючих УЗ пластин);

F_1 і F_2 – зусилля притиснення робочих інструментів 11 і 12 до просочених тканих ВН;

α_1 і α_2 – кути нахилу робочих інструментів 11 і 12 до поверхні просоченого волокнистого матеріалу

Основними формоутворювальними елементами блоку *Д* є робочі УЗ-інструменти (поз. 11 і 12 на рис. 6.4), що контактують з оброблюваним просоченим тканим матеріалом.

У свою чергу, вищевказані робочі УЗ-інструменти 11 і 12 складаються з декількох послідовно розташованих структурних елементів різної форми і розмірів, причому деякі з них також виконані з різних матеріалів (рис. 6.2,б).

Необхідна резонансна частота коливань $f_{ст}$ забезпечується вибором відповідних розмірів і матеріалу накладок 8, 10 і концентратора УЗК 11 (рис. 6.3).

При цьому безсумнівний інтерес у плані проведення автоматизованого розрахунку для оптимізації конструкторсько-технологічних робіт викликає

створення і практичне використання відповідної методики варіантного параметричного комп'ютерного конструювання досліджуваних об'єктів, яка наводиться нижче.

6.2.1. Основні положення методики варіантного параметричного комп'ютерного конструювання складеного ультразвукового кавітаційного пристрою

Для досліджуваної коливальної системи, сформованої на основі пластини, що здійснює вигинні коливання, а також УЗ-вібраторів і УЗГ [61], проводяться варіантні автоматизовані розрахунки, що забезпечують визначення резонансних акустичних розмірів елементів, які складають систему. Це стосується, в першу чергу, ПЕП і трансформаторів швидкості (акустичних концентраторів).

При проектуванні розглянутих коливальних систем головна складність полягає в необхідності експериментального підбору розмірів випромінюючих пластин [27, 54, 94], які раціонально враховують особливості здійснюваного технологічного процесу (в даному випадку – дозування). Джерелом УЗК є складений ПЕП 6, що складається з двох послідовно встановлених елементів (див. рис. 6.3).

Розроблена методика параметричного комп'ютерного конструювання складеного УЗ-кавітаційного пристрою з випромінюючою прямокутною пластиною базується на наступних положеннях. У підрозділі 2.3.3 вказувалося, що з точки зору структурно-параметричного підходу для УЗ-інструменту розглянутого блоку дозування D кортеж його розрахункових компонентів має залежність (2.9), куди входять наступні параметри пластини, концентратора (трансформатора) швидкості та ПЕП: D_1 – випромінюючий циліндр еквівалентного перетину, моделюючий частину випромінюючої пластини, що примикає до концентратора; D_6 – ПЕП; D_8, D_{10} – знижуючі частоту накладки; D_9 – електроди; D_{11} – складений концентратор УЗК (трансформатор швидкості).

У свою чергу, кожен з компонентів (2.9) може бути представлений як кортеж проектних варіантів:

$$D_i = (D_{ij})_1^{N_{D_i}}, \quad (6.1)$$

де $i \in \{1, 6, 8, 9, 10, 11\}$;

N_{D_i} – відповідне число варіантів.

Зручним засобом наочного зображення впорядкованих множин (6.1) є графи (рис. 6.5).

Для випромінюючого циліндра D_1 (поз. 1 на рис. 6.3) аналізований кортеж проектних варіантів формується за рахунок цілеспрямованого варіювання такими параметрами випромінюючої пластини 1, як її матеріал і товщина, а також власна частота згинальних коливань (частота коливань УЗГ), що впливає на довжину та ширину пластини, які приймаються кратними розрахунковій довжині хвилі в ній.

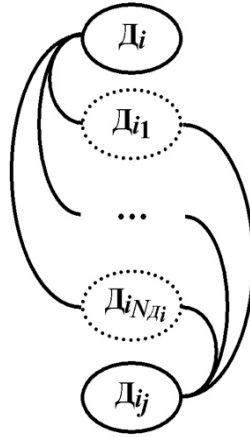


Рис. 6.5. Приклад візуалізації кортежів (6.1) складових компонентів блоку дозування D у вигляді графів

Для проведення обчислень може використовуватися, наприклад, наступний кортеж значень фіксованих частот коливань УЗГ (які є його паспортною характеристикою):

$$f = (16 \text{ кГц}, 18 \text{ кГц}, 20 \text{ кГц}, 22 \text{ кГц}, 24 \text{ кГц}). \quad (6.2)$$

В якості ПЕП D_6 (поз. 6 на рис. 6.3) вибирають елементи, зокрема, у вигляді кілець або дисків, різних розмірів з певної номенклатури п'єзоелектричних матеріалів.

Наведений рис. 6.6 показує, що кількість варіантів кільцевих і дискових п'єзоелементів у даній моделі відповідно дорівнює N_K і N_D , а $N_6 = N_K + N_D$.

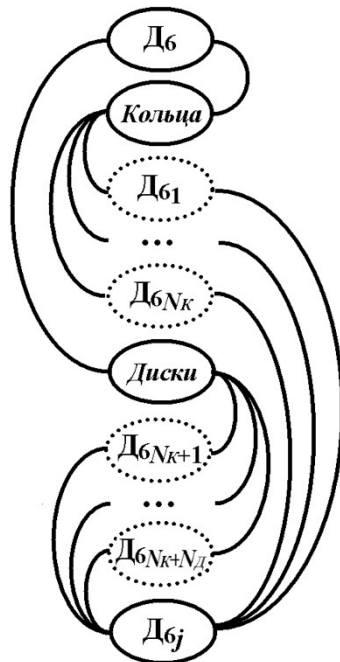


Рис. 6.6. Структурно-параметрична модель ПЕП D_6

При цьому геометричними параметрами дисків є їх діаметр і висота, а кілець – зовнішній і внутрішній діаметри, а також висота.

Застосовувану номенклатуру п'єзоелектричних матеріалів може становити наступна множина:

$$M_6 = (\text{ЦТССТ-3, ПКВ-460}). \quad (6.3)$$

Варіанти знижуючих частоту накладок D_8 і D_{10} визначаються розрахунковими методами шляхом варіювання такими їх параметрами, як матеріал, площа поперечного перерізу і висота. При цьому слід зазначити взаємозв'язок зазначених геометричних величин і відповідних параметрів елементів ПЕП D_6 , а також вплив на них частоти коливань УЗГ.

Товщина електродів D_9 лежить в діапазоні 0,2 – 0,3 мм, а форма їх поперечного перерізу відповідає розмірам п'єзоелементів D_6 і знижуючих частоту накладок D_8 і D_{10} . Зазначеним методом створюється належний масив проектних варіантів електродів D_9 .

Заключним компонентом множини (6.1) є концентратор УЗК D_{11} , матеріал, форма та розміри якого також варіюються. Так, наприклад, можуть застосовуватися циліндричні двоступінчасті, конічні, експонентні, катеноїдальні та ін. трансформатори швидкості [71].

Виходячи з цього визначається необхідний кортеж аналізованих модифікацій D_{11} , див. рис. 6.7, де символами Ц , К , Е позначені підмножини циліндричних Ц , конічних К й експонентних Е концентраторів УЗК, а через $N_{\text{Ц}}$, $N_{\text{К}}$ і $N_{\text{Е}}$ відповідне число їх проектних варіантів. При цьому $N_{11} = N_{\text{Ц}} + N_{\text{К}} + N_{\text{Е}}$.

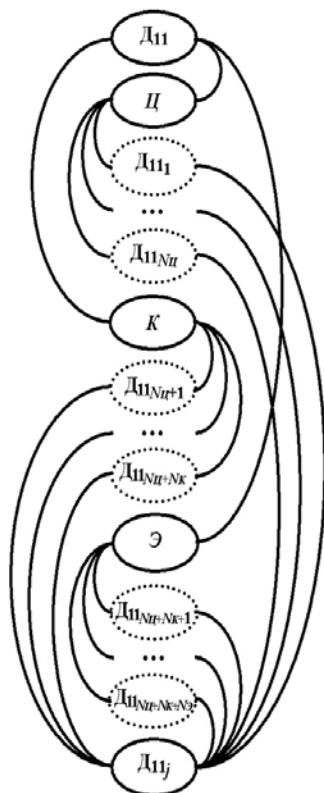


Рис. 6.7. Структурно-параметрична модель компонента D_{11}

Номенклатуру конструкційних матеріалів для випромінюючого циліндра D_1 , знижуючих частоту накладок D_8 і D_{10} , електродів D_9 і концентратора УЗК D_{11} може становити наступний кортеж:

$$M = (\text{латунь, мідь, титан, нікель, алюміній, сталь}), \quad (6.4)$$

елементи якого впорядковані за зростанням величини швидкості звуку в них.

На рис. 6.8 подано структурно-параметричну модель конструкції блоку дозування D відповідно до виразів (6.1) – (6.3). Елементи матриць суміжності є логічними виразами зі значеннями «істина» або «хибність». Вони визначають можливість взаємодії між собою проектних варіантів розглянутих компонентів блоку дозування D .

Дуги показаних графів несуть кількісну інформацію про вибрані і розраховані конструктивно-технологічні параметри, наприклад, згідно з розглянутими у роботі [61] математичними формулами. Наведені на рис. 6.8, в проектні варіанти блоку дозування D є простими елементарними шляхами з початком у вершині D_1 і кінцем у вершині D_{11} . Загальна їх кількість визначається елементами матриць суміжності.

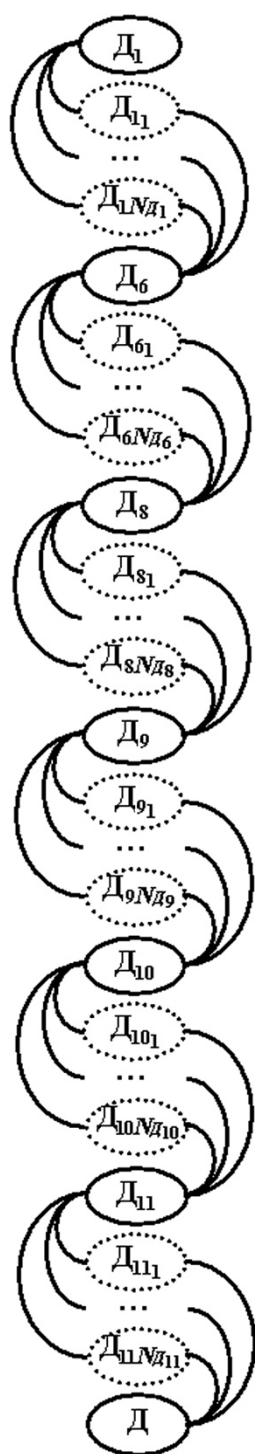
На базі проаналізованих вище конструктивно-технологічних параметрів компонентів кортежу (2.9), для їх оптимізації, згідно сформованих аналітичних залежностей, розраховуються довжини дуг зображеного на рис. 6.8,а графа. Тоді пошук оптимального структурно-параметричного проектного варіанту модельованого блоку дозування D зводиться до визначення екстремального шляху в даному графі. Для вирішення цього завдання є різні методи, зокрема, індексації вершин [95], гілок і меж [96] і т.д.

Наведені залежності (2.9), (6.1) – (6.4) дають можливість проведення варіантного параметричного комп'ютерного конструювання проектного УЗ-кавітаційного пристрою.

Вищеописану методику доцільно використовувати на стадії конструкторсько-технологічного проектування дозуючих пристроїв, а саме кавітаційного пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною, застосовуваного в технології формування реактопластичних КВМ [27].

Таким чином, у даному підрозділі подано основні положення запропонованої методики варіантного параметричного конструювання блоку дозування ультразвукового кавітаційного пристрою.

Зазначені матеріали в подальшому використовуються для комп'ютерного твердотілого моделювання проаналізованих елементів конструкції, яке розглядається в підрозділі 6.4.



а

$D_1 \backslash D_6$	D_{61}	...	D_{6ND_6}
D_{11}
...
D_{1ND_1}

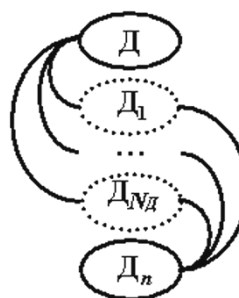
$D_6 \backslash D_8$	D_{81}	...	D_{8ND_8}
D_{61}
...
D_{6ND_6}

$D_8 \backslash D_9$	D_{91}	...	D_{9ND_9}
D_{81}
...
D_{8ND_8}

$D_9 \backslash D_{10}$	D_{101}	...	$D_{10ND_{10}}$
D_{91}
...
D_{9ND_9}

$D_{10} \backslash D_{11}$	D_{111}	...	$D_{11ND_{11}}$
D_{101}
...
$D_{10ND_{10}}$

б



в

Рис. 6.8. Структурно-параметрична модель блоку дозування D [26]:

- a – граф структури;
- $б$ – матриці суміжності компонентів;
- $в$ – граф варіантів конструкції

6.3. Оптимізація конструкторсько-технологічних параметрів складеного ультразвукового дозуючого пристрою

У роботах [61, 138] було показано, що для елементів конструкції складеного УЗ-вібратора (диспергатора), що включає випромінюючий циліндр, еквівалентний за масою секції випромінюючої УЗ пластини, ПЕП, знижуючі частоту накладки, концентратор УЗК (рис. 6.1 – рис. 6.3), справедливі наступні математичні залежності:

$$l_{CT} = \frac{\lambda_{CT}}{2} \sqrt{\frac{c_{CT} H_{CT}}{\pi \sqrt{3} f_{CT}}}, \quad (6.5)$$

де l_{CT} – довжина еквівалентного чотиригранного стрижня (довжина хвилі);

f_{CT} – власна частота згинальних коливань;

c_{CT} – швидкість поширення звуку в стрижні при поздовжніх коливаннях;

H_{CT} – висота стрижня або випромінюючої пластини однакової зі стрижнем товщини;

λ_{CT} – порядок частоти, який вибирається залежно від порядку (моди) коливань n_k з наступного ряду [5, 44]:

4,75 ($n_k = 1$); 7,853 ($n_k = 2$); 10,996 ($n_k = 3$); 14,137 ($n_k = 4$); 17,279 ($n_k = 5$).

Довжина $L_{пл}$ і ширина $H_{пл}$ випромінюючої УЗ пластини обираються кратними розрахованій за залежністю (6.5) довжині хвилі l_{CT} :

$$L_{пл} = N_l l_{CT}; \quad B_{пл} = M_B l_{CT}, \quad (6.6)$$

де N_l и M_B – число секцій з УЗ-вібраторами відповідно вздовж довжини та ширини випромінюючої пластини.

Необхідна кількість УЗ-вібраторів визначається співвідношенням:

$$N = 2N_l - 1; \quad M = 2M_B - 1, \quad (6.7)$$

де N і M – їх кількість відповідно уздовж довжини і ширини випромінюючої пластини.

На рис. 6.9 показані складові елементи однохвильового УЗ-диспергатора [97], що кріпиться до випромінюючої пластини.



Рис. 6.9. Складові елементи однохвильового УЗ-диспергатора, виконаного з симетричним пакетним ПЕП [97]

У свою чергу, для характеристик матеріалів елементів конструкції складеного УЗ-диспергатора та їх геометрії у вигляді векторів (E_i, S_j, c_k) , де $i, j, k \in \{1, 2, 3, 4\}$, а також довжин $a_1, a'_1, a_2, a_3, b, l$ справедливі наступні аналітичні співвідношення [61, 138, 141]:

$$a_1 = \frac{c_1}{\omega} \arctg \frac{E_2 S_2 c_1 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 + E_1 S_1 c_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} a_2}{E_1 S_1 c_2 - E_2 S_2 c_1 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} a_2} - a_2, \quad (6.8)$$

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \arctg \frac{E_3 S_3 c_4}{E_4 S_4 c_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_4} b}, \quad (6.9)$$

$$l = \frac{c_3}{4f}, \quad (6.10)$$

де E – модуль пружності щодо розтягання;

S – площа поперечного перерізу;

c – швидкість звуку в матеріалі;

$\omega = 2\pi f$, f – частота коливань УЗГ 7.

Перший вираз (6.8) дозволяє розрахувати товщину a_1 знижуючої частоту накладки 10 при заданих параметрах її матеріалу і геометрії (E_1, S_1, c_1) , а також вибраному матеріалі і типорозмірі (E_2, S_2, c_2) ПЕП 6.

У разі виконання накладки 8 з того ж матеріалу, що і накладка 10, маємо $a'_1 = a_1$. Інакше в розглянутій формулі потрібно провести заміни E_1, c_1 відповідно на E_3, c_3 . У результаті перетворень отримаємо [61, 138, 141]:

$$a'_1 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_2 S_2 c_3 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 + E_3 S_1 c_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_2}{E_3 S_1 c_2 - E_2 S_2 c_3 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_2} - a_2 \quad (6.11)$$

Варіантне комп'ютерне параметричне конструювання кавітаційних пристроїв із прямокутною випромінюючою пластиною, що здійснює УЗК, з використанням залежностей (6.5) – (6.11) рекомендується виконувати в наступному порядку.

На *першому етапі* потрібно створити кортеж бажаних резонансних частот $f_{\text{ст}}$ УЗК, характерних для розроблюваного технологічного процесу, які визначають інтенсивність кавітації.

Нехай у нашому випадку це буде частота УЗГ. Тоді можемо записати:

$$f_{\text{ст}} = (f_{\text{ст}i})_1^5 = (16 \text{ кГц}, 18 \text{ кГц}, 20 \text{ кГц}, 22 \text{ кГц}, 24 \text{ кГц}). \quad (6.12)$$

На *другому етапі* необхідно сформувати масив аналізованих матеріалів для елементів конструкції проектного УЗ-кавітаційного пристрою, наприклад, у вигляді табл. 6.1, дані якої впорядковані за зростанням швидкості звуку в матеріалі.

Таблиця 6.1. Фізичні властивості використовуваних матеріалів

Матеріал	Швидкість звуку в матеріалі c , м/с	Модуль пружності матеріалу E , МПа
ЦТССТ-3	3200	$7,5 \cdot 10^4$
ПКВ-460	3200	$7,9 \cdot 10^4$
Латунь	3300	$1,0 \cdot 10^5$
Мідь	3700	$1,2 \cdot 10^5$
Титан	4900	$1,1 \cdot 10^5$
Нікель	5000	$2,0 \cdot 10^5$
Алюміній	5100	$7,2 \cdot 10^4$
Сталь	5200	$2,1 \cdot 10^5$

При виконанні *третього етапу* потрібно визначити можливі варіанти геометрії п'єзoeлементів, наприклад, у вигляді табл. 6.2, і товщини $H_{\text{пл}}$ випромінюючої пластини, виходячи з конструктивно-технологічних особливостей реалізації конкретного виробничого процесу. При цьому $c_{\text{пл}} = c_4$, $E_{\text{пл}} = E_4$.

Нехай маємо наступний кортеж:

$$H_{\text{пл}} = (H_{\text{пл}i})_1^4 = (0,008 \text{ м}, 0,01 \text{ м}, 0,012 \text{ м}, 0,015 \text{ м}). \quad (6.13)$$

Таблиця 6.2. Розміри кільцевих п'єзоелементів

Матеріал	Діаметр зовнішній D , мм	Діаметр внутрішній d , мм	Товщина H , мм
ЦТССТ-3	20	10	2
ЦТССТ-3	20	10	2
ЦТССТ-3	30	14	2
ЦТССТ-3	30	14	2
ЦТССТ-3	30	14	4
ЦТССТ-3	30	14	5
ЦТССТ-3	35	15	2,5
ЦТССТ-3	35	15	4,2
ЦТССТ-3	35	15	5
ЦТССТ-3	38	15	4,2
ЦТССТ-3	38	16	5
ЦТССТ-3	50	20	3
ЦТССТ-3	50	20	4
ПКВ-460	30	14	3
ПКВ-460	30	14	4
ПКВ-460	30	14	5
ПКВ-460	35	15	5
ПКВ-460	35	15	6
ПКВ-460	38	15	5
ПКВ-460	38	16	6
ПКВ-460	50	20	6

На *четвертому етапі* конструювання УЗ-кавітаційного пристрою для опрацюваних комбінацій, вибраних із кортежу (6.12) резонансної частоти $f_{\text{ст}}$ УЗК, матеріалів із табл. 6.1, розмірів п'єзоелементів із табл. 6.2 та товщини пластини $H_{\text{пл}}$ з множини (6.13), за формулою (6.5) розраховується довжина хвилі $l_{\text{ст}}$ згинальних коливань випромінюючої пластини для потрібної моди коливань n_k (порядку частоти $\lambda_{\text{ст}}$).

У відповідності з величиною $l_{\text{ст}}$ і необхідними параметрами конкретного технологічного процесу обчислюється необхідна довжина та ширина випромінюючої пластини, а також кількість УЗ-вібраторів на базі ПЕП згідно з залежностями (6.6) і (6.7).

На *п'ятому етапі*, використовуючи значення маси секції випромінюючої пластини та кріплення УЗ-випромінювача, визначаються характеристики еквівалентного циліндра 1.

На шостому етапі конструювання для резонансної частоти $f_{\text{пл}} = f_{\text{ст}}$ випромінюючої пластини за формулами (6.8) – (6.10) розраховуються наступні акустичні розміри таких елементів складеного УЗ-випромінювача (рис. 6.3):

- довжина a_1 знижуючої частоту накладки 10;
- довжини a_3 і l відповідно ступені меншого та більшого діаметра концентратора УЗК 11.

Таким чином, вихідними даними для варіантного параметричного конструювання розглянутого УЗ-кавітаційного пристрою з випромінюючою пластинною є розміри та фізичні властивості застосовуваних п'єзоматеріалів (a_2 , S_2 , E_2 , c_2), частотознижуючих накладок (S_1 , E_1 , c_1), трансформатора швидкості (S_3 , E_3 , c_3) і випромінюючої пластини ($H_{\text{пл}}$, S_4 , E_4 , c_4).

В якості контрольованих величин УЗК низькочастотного діапазону (16 – 24 кГц) вибирається частота f , амплітуда A й інтенсивність I пружних коливань, що генеруються зовнішньою поверхнею випромінюючої пластини в навколишнє середовище.

На підставі вищевикладеного, *сьомий етап* пропонованої методики конструювання полягає в ітераційному доведенні, шляхом цілеспрямованого автоматизованого варіювання елементами множин (6.12) та (6.13), даними табл. 6.1 і табл. 6.2, для досягнення необхідних технологічних параметрів частоти f , амплітуди A та інтенсивності I пружних коливань випромінюючої пластини.

При цьому, для аналітичної обробки отримуваних експериментальних даних, рекомендується широко використовувати різноманітні методи інтерполяції та апроксимації, в тому числі наявні в таких математичних комп'ютерних пакетах, як MathCAD, Maple, MatLab та ін.

Керуючи величиною амплітуди A коливань, необхідно враховувати наступну залежність коефіцієнта k_n її підсилення для двоступеневого циліндричного концентратора від його геометрії:

$$k_n = \sqrt{\frac{S_1}{S_3}} = \frac{D_1}{D_3}, \quad (6.14)$$

де D_1 і D_3 – відповідно більший і менший діаметри концентратора.

При варіантному конструюванні розглянутого УЗ-кавітаційного пристрою доцільно використовувати комп'ютерну візуалізацію застосовуваних аналітичних залежностей у вигляді певних множин відповідних геометричних моделей, побудованих у тривимірному параметричному просторі.

Зокрема, для формул (6.5), (6.10), (6.14) це можуть бути моделі, подані на рис. 6.10. Головною їх перевагою є наочність і зручність використання в інженерній практиці.

Зображення рис. 6.10,а ілюструють параметричні співвідношення між довжиною хвилі $l_{\text{ст}}$ згинальних коливань випромінюючої УЗ пластини, її резонансною частотою $f_{\text{ст}}$ і товщиною $H_{\text{ст}}$ залежно від конструкторського матеріалу ($c_{\text{ст}}$) та моди коливань n_k .

Геометрична модель рис. 6.10, б побудована для виразу (6.8) за умови, що площі поперечних перерізів ПЕП і знижуючих частоту накладок рівні, тобто $S_2 = S_1$. Діленням чисельника і знаменника дробу, що є аргументом арктангенса в розглянутому виразі, отримуємо:

$$a_1 = \frac{c_1}{\varpi} \operatorname{arctg} \frac{\frac{E_2 S_2}{E_1 S_1} c_1 \operatorname{ctg} \frac{\varpi}{c_2} a_2 + c_2 \operatorname{tg} \frac{\varpi}{c_1} a_2}{c_2 - \frac{E_2 S_2}{E_1 S_1} c_1 \operatorname{ctg} \frac{\varpi}{c_2} a_2 \operatorname{tg} \frac{\varpi}{c_1} a_2} - a_2. \quad (6.15)$$

Формула (6.15) показує, що у випадку $S_2 = S_1$ необхідна величина a_1 не залежить від наведених значень площ і є тільки функцією вибраних конструкційних матеріалів, частоти коливань f УЗГ та товщини a_2 п'єзоелементів.

З рис. 6.10, б також видно, що для певної комбінації матеріалу п'єзоелементів і знижуючих частоту накладок зі збільшенням частоти коливань f УЗГ і товщини a_2 п'єзоелементів необхідна товщина a_1 зазначених накладок зменшується.

Якщо використовувати для трансформатора швидкості та випромінюючої пластини однаковий матеріал, то вираз (4.9) запишеться у вигляді:

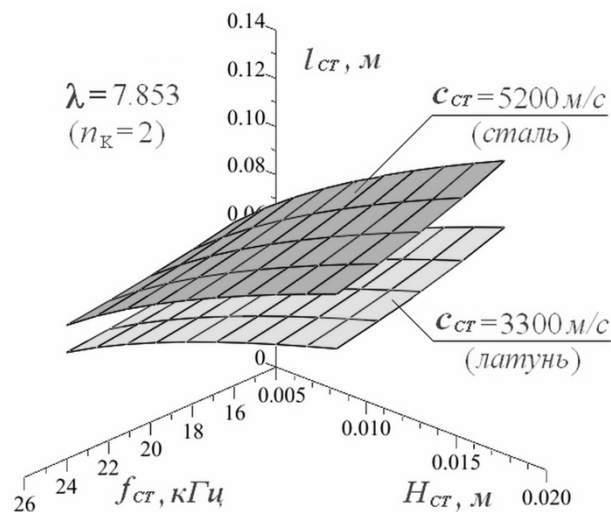
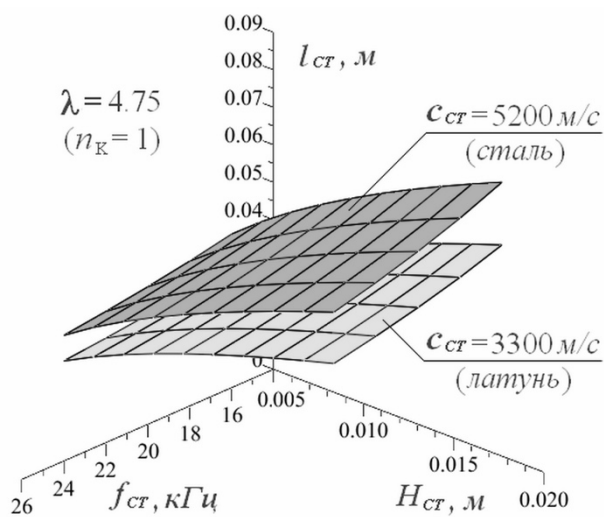
$$a_3 = \frac{c_3}{\varpi} \operatorname{arctg} \frac{S_3}{S_4 \operatorname{tg} \frac{\varpi}{c_4} b}, \quad (6.16)$$

На рис. 6.10, в наведена відповідна формулі (6.16) геометрична модель. Вона показує, що зі збільшенням частоти коливань f УЗГ, а також товщини b випромінюючої пластини потрібна довжина a_3 ступені меншого діаметра трансформатора швидкості зменшується.

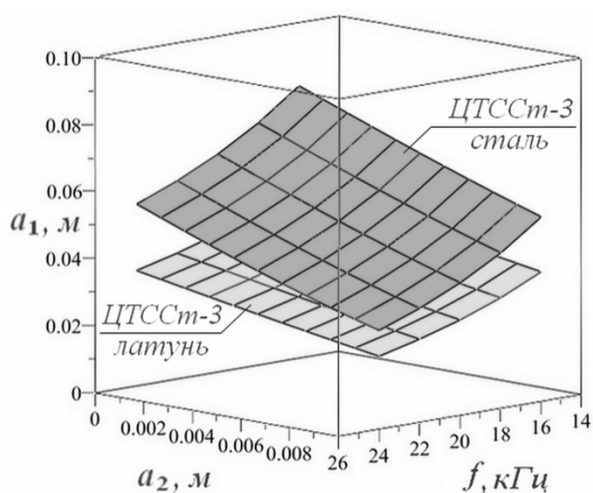
Вплив матеріалу (швидкості звуку c) і частоти коливань f УЗГ на необхідну довжину l ступені більшого діаметра трансформатора швидкості ілюструє рис. 6.10, г. З нього видно, що збільшення частоти коливань f і зниження швидкості звуку c у використовуваному матеріалі приводить до відповідного зменшення розглянутої довжини l , і відповідно, до економії матеріалу на виготовлення трансформатора швидкості.

Рис. 6.10, д дає наочне уявлення, на підставі співвідношення (6.14), про залежність коефіцієнта k_n посилення амплітуди коливань двоступеневого циліндричного концентратора від співвідношення його діаметрів D_1 і D_3 .

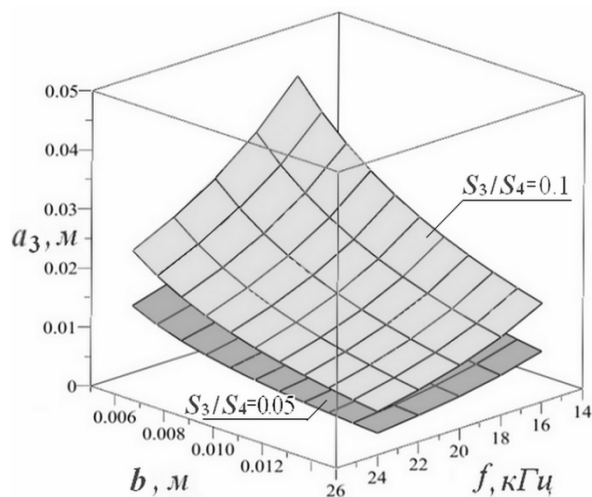
Суттєво підвищити продуктивність і якість автоматизованого конструювання проаналізованих кавітаційних пристроїв із випромінюючими пластинами можна шляхом об'єднання розглянутих процедур проектування в єдиний інтегрований комп'ютерний прикладний програмний комплекс.



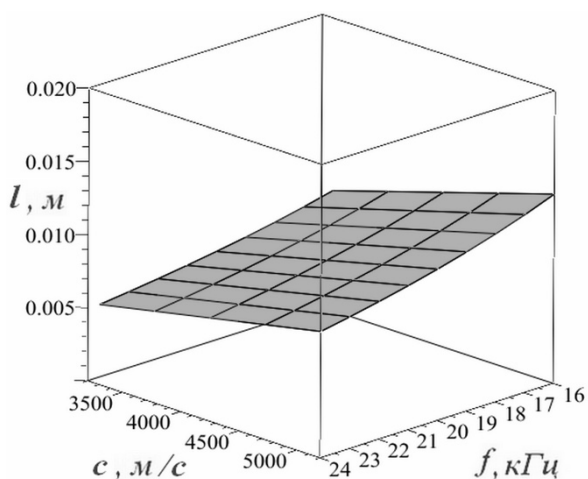
а



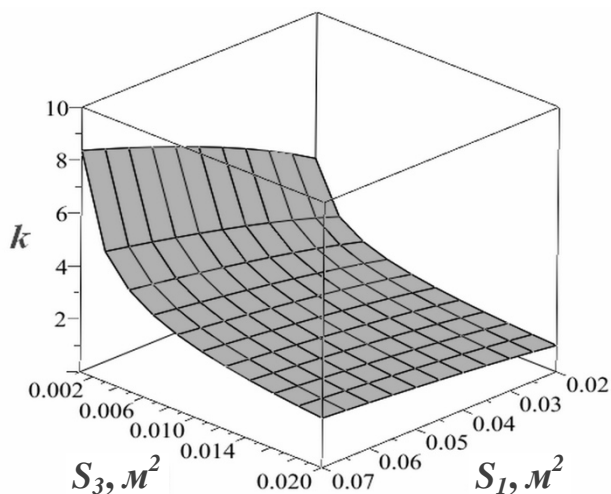
б



в



г



д

Рис. 6.10. Приклади параметричної візуалізації використовуваних математичних залежностей: а – формули (6.5); б, в, г – співвідношень (6.8) – (6.10); д – залежності (6.14)

6.4. Комп'ютерне варіантне 3D-конструювання складеного ультразвукового дозуючого пристрою

На рис. 6.11 показана комп'ютерна параметрична 3D-модель конструкції випромінюючої пластини, для формоутворення якої використовуються такі її розміри, як товщина $H_{\text{пл}}$, ширина $B_{\text{пл}}$, довжина $L_{\text{пл}}$, менший діаметр d_{11} УЗ-концентратора D_{11} , а також довжина хвилі $l_{\text{ст}}$ у пластині, розрахована за співвідношенням (6.5).

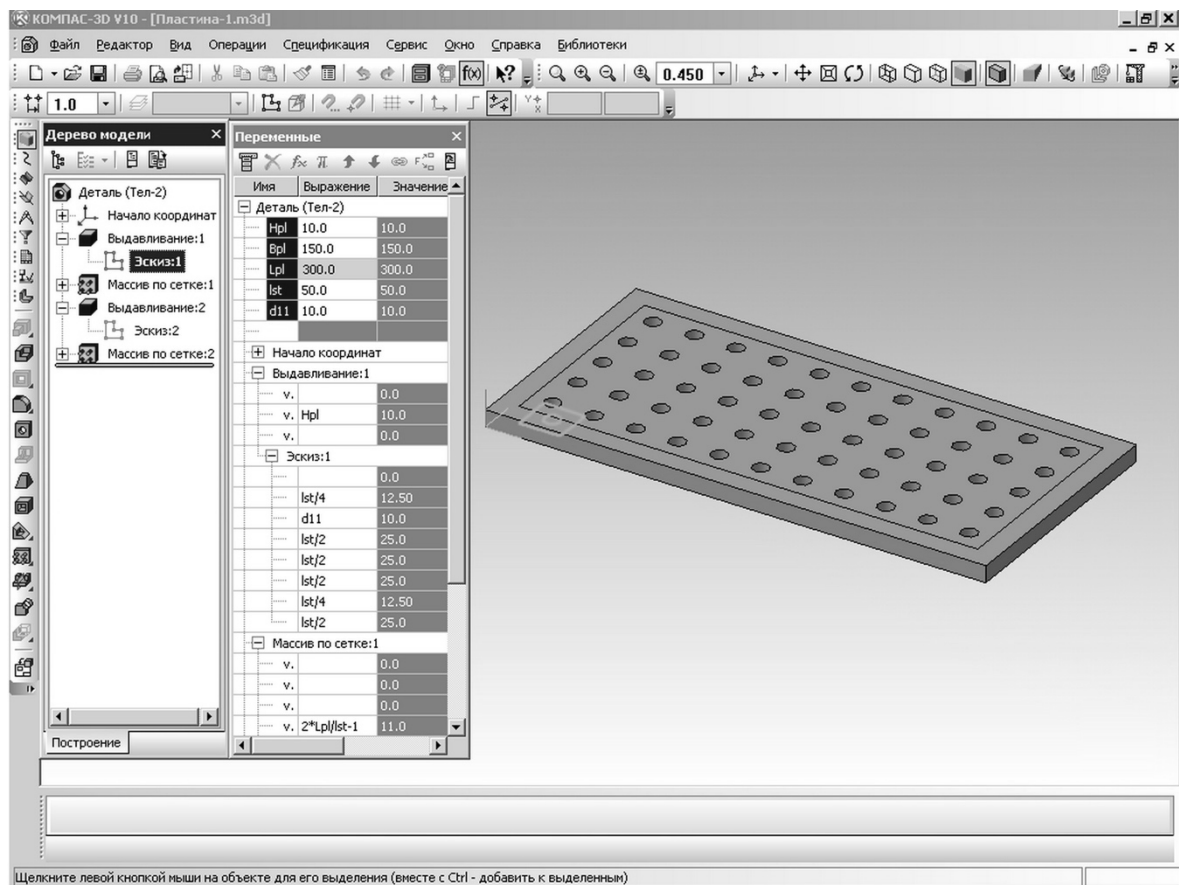
У наведеній на рис. 6.11 моделі використані такі значення вхідних параметрів: $H_{\text{пл}} = 10$ мм, $B_{\text{пл}} = 150$ мм, $L_{\text{пл}} = 300$ мм, $l_{\text{ст}} = 50$ мм, $d_{11} = 10$ мм. При цьому довжина хвилі $l_{\text{ст}}$ визначена за формулою (6.5) для наступних величин: $\lambda_{\text{ст}} = 4,75$; $c_{\text{пл}} = 5200$ м/с (сталь); $f_{\text{пл}} = 22$ кГц.

Створення геометрії розглянутої моделі дозуючої пластини ґрунтується на побудові плоского *Ескізу 1*, який відповідає секції з одним УЗ-вібратором (див. рис. 6.11,а,з). Далі здійснюється «видавлювання» цього ескізу на задане значення товщини пластини $H_{\text{пл}}$ для отримання 3D-фігури і подальшого її дублювання у вигляді прямокутного масиву з числом УЗ-вібраторів по ширині $B_{\text{п}}$ пластини, рівним $M = 2B_{\text{пл}}/l_{\text{ст}} - 1$, а по її довжині $L_{\text{пл}}$ – рівним $N = 2L_{\text{пл}}/l_{\text{ст}} - 1$.

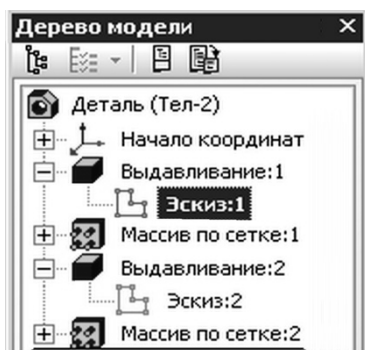
Необхідний контур окантовування формується аналогічно описаній процедурі на базі *Ескізу 2*, який є квадратом зі стороною $l_{\text{ст}}/4$. Кількість елементів масиву в цьому випадку уздовж ширини випромінюючої пластини дорівнює $4B_{\text{пл}}/l_{\text{ст}}$, а вздовж її довжини – дорівнює $4L_{\text{пл}}/l_{\text{ст}}$.

Наведені на рис. 6.12 проектні варіанти випромінюючої пластини створюються простою зміною належних величин у блоці вхідних параметрів моделі (див. рис. 6.11,в).

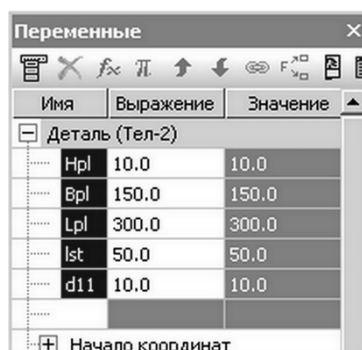
Такі компоненти аналізованого УЗ дозуючого кавітаційного пристрою, див. вираз (4.5), як ПЕП D_6 , знижуючі частоту накладки D_8 і D_{10} , електроди D_9 можуть виконуватися у вигляді дисків (циліндрів) або кілець (трубок). При цьому геометричними параметрами дисків (циліндрів) є їх діаметр і висота, а кілець (трубок) – зовнішній і внутрішній діаметри, а також висота.



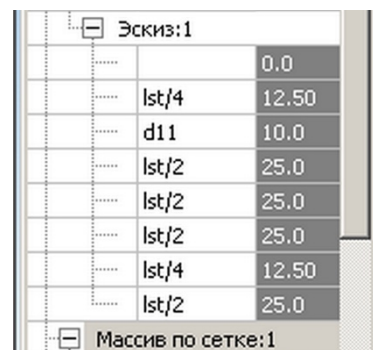
a



б



в



г

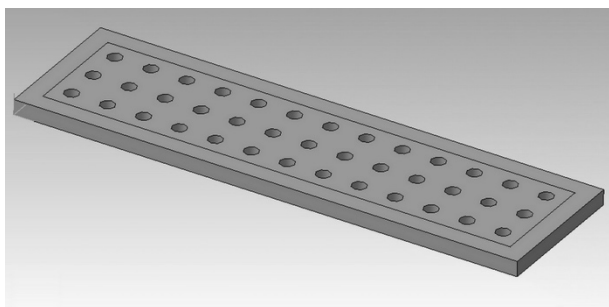
Рис. 6.11. Параметричне комп'ютерне конструювання випромінюючої дозуючої пластини D_1 :

a – загальний вигляд моделі;

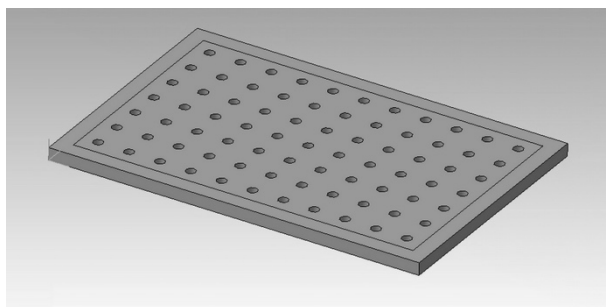
б – дерево побудов;

в – блок вхідних параметрів;

г – фрагмент блоку розрахункових параметрів



a



б

Рис. 6.12. Варіанти конструкції випромінюючої пластини D_1 :
a – $H_{\text{пл}} = 10$ мм, $B_{\text{пл}} = 100$ мм, $L_{\text{пл}} = 350$ мм, $l_{\text{ст}} = 50$ мм, $d_{11} = 10$ мм;
б – $H_{\text{пл}} = 10$ мм, $B_{\text{пл}} = 200$ мм, $L_{\text{пл}} = 300$ мм, $l_{\text{ст}} = 50$ мм, $d_{11} = 8$ мм

На рис. 6.13 в якості відповідного прикладу показана модель знижуючої частоти накладки D_{10} у вигляді трубки з поточними параметрами зовнішнього діаметра $D_{10} = 30$ мм, внутрішнього діаметра $d_{10} = 14$ мм і висоти $H_{10} = 54$ мм. Формування цієї фігури здійснюється шляхом побудови *Ескизу 1* у вигляді плоского кільця з належними розмірами та подальшого його «видавлювання» на задану висоту для отримання необхідного 3D-об'єкта.

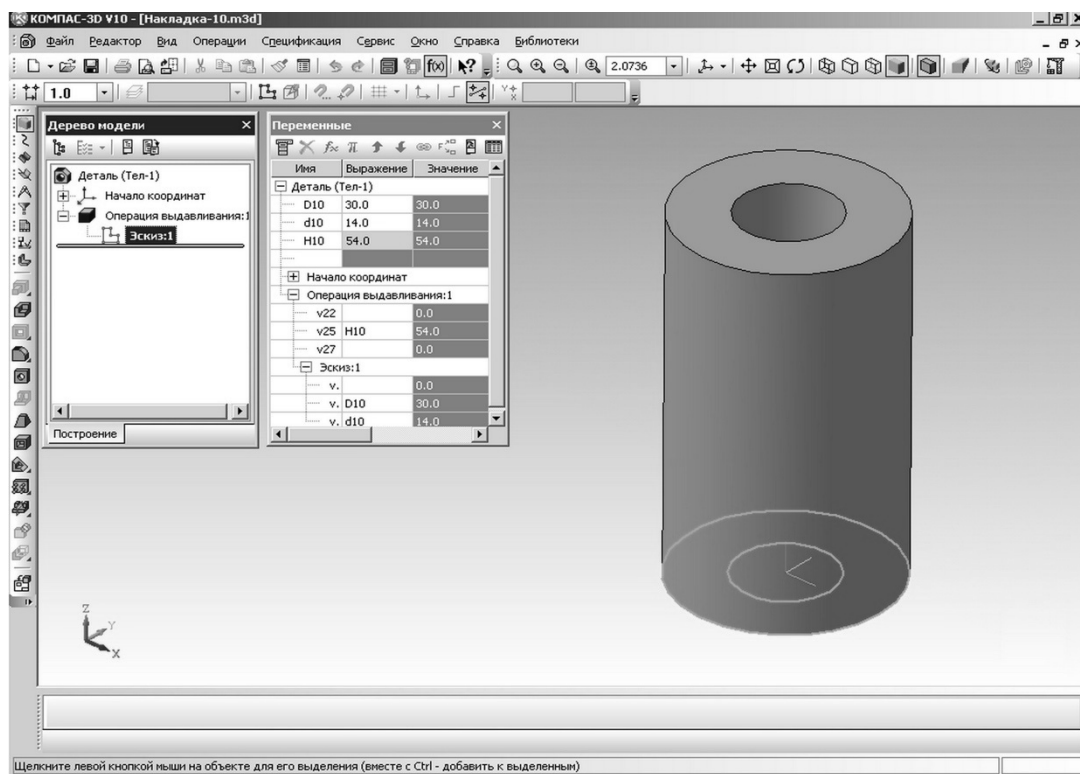


Рис. 6.13. Параметрична модель трубчастої частини знижуючої частоту накладки D_{10}

При створенні дисків (циліндрів) значення внутрішнього діаметра не використовується.

Визначення конкретних величин зазначених геометричних параметрів компонентів D_6 , D_8 , D_9 , D_{10} розглянутого дозуючого УЗ-кавітаційного пристрою здійснюється згідно з викладеною в попередньому підрозділі 6.3 методикою та наведеним там же аналітичним залежностям. При цьому для варіантних розрахунків, окрім частоти коливань УЗГ, широко використовуються такі характеристики різноманітних застосовуваних конструкційних матеріалів, як швидкість звуку c в них і модуль пружності щодо розтягання E .

Моделювання складеного двоступеневого циліндричного концентратора D_{11} реалізується наступним чином (рис. 6.14). На базі першого Ескизу з колом меншого діаметра d_{11} і другого Ескизу з колом більшого діаметра D_{11} створюються два циліндри відповідно з висотою $h_{11} + H_{11}$ і H_{11} , де необхідні значення h_{11} і H_{11} обчислюються згідно з аналітичними залежностями, наведеними в попередньому підрозділі 6.3.

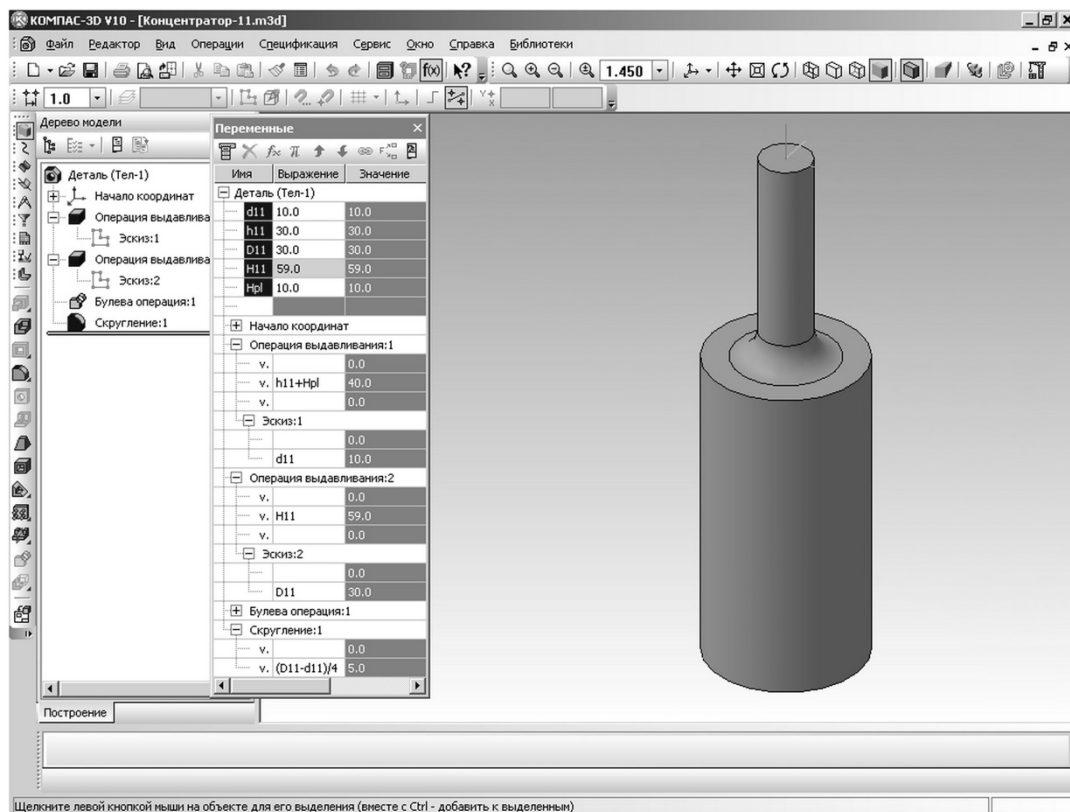


Рис. 6.14. Параметрична модель двоступеневого циліндричного УЗ- концентратора D_{11}

Далі зазначені об'єкти булевою операцією об'єднуються в одне тіло і виконується скруглення ребра їх стику радіусом $(D_{11} - d_{11})/4$. Слід враховувати, що коефіцієнт k_n посилення концентратором амплітуди УЗК буде рівним відношенню D_{11}/d_{11} .

На рис. 6.15, а,б показані проектні варіанти конструкції УЗ-концентратора D_{11} , отримані шляхом зміни величин параметрів розглянутої комп'ютерної 3D-моделі.

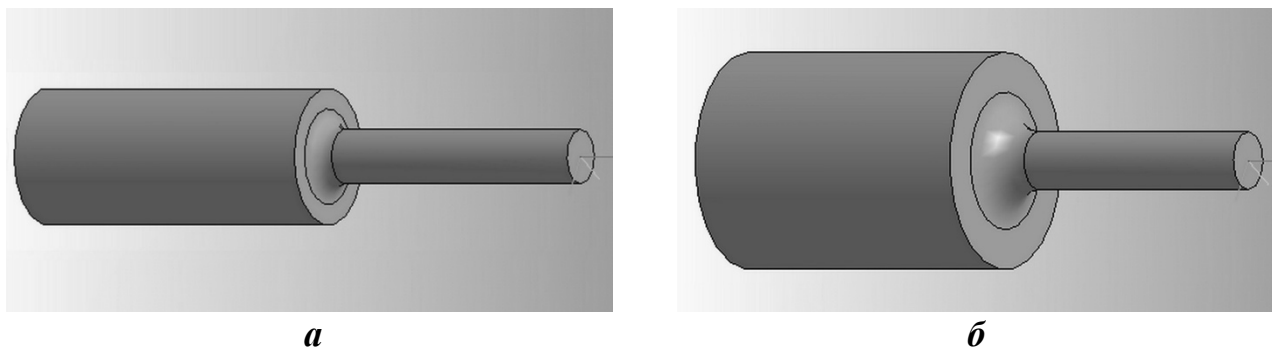


Рис. 6.15. Параметричні варіанти двоступеневого циліндричного концентратора D_{11} :

а – $d_{11} = 8$ мм, $h_{11} = 40$ мм, $D_{11} = 20$ мм, $H_{11} = 50$ мм, $H_{пл} = 5$ мм;
 б – $d_{11} = 8$ мм, $h_{11} = 30$ мм, $D_{11} = 30$ мм, $H_{11} = 42$ мм, $H_{пл} = 10$ мм

Рис. 6.16 ілюструє параметричну модель УЗ-вібратора, зібраного з розглянутих вище компонентів кортежу (6.5). При створенні цієї складальної одиниці для входних деталей використовувалися такі види сполучень, як збіг площин і співвісність циліндричних поверхонь.

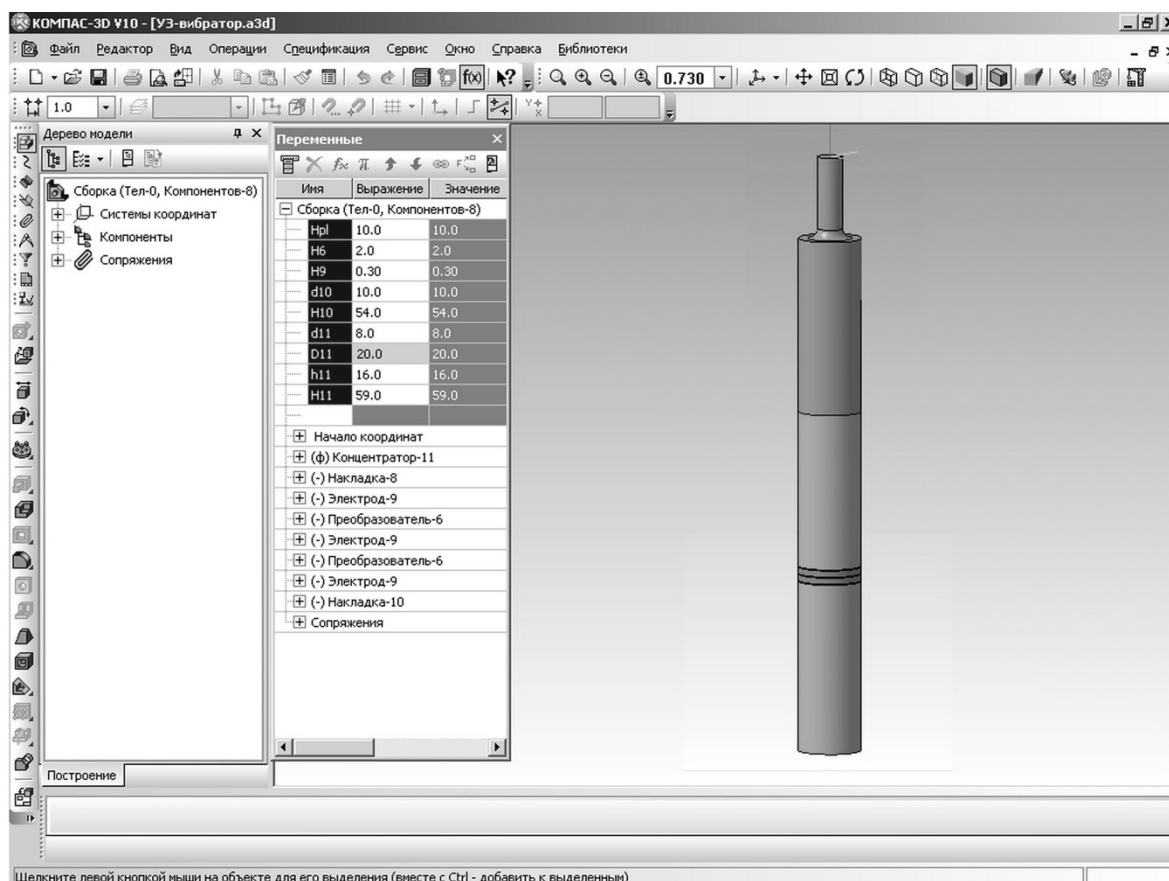


Рис. 6.16. Параметрична складальна одиниця УЗ-вібратора.

Зовнішніми параметрами даної моделі є: $H_{пл}$ – товщина випромінюючої пластини; H_6 і H_9 – товщини ПЕП і електродів; d_{10} і H_{10} – внутрішній діаметр і висота частотознижуючих накладок; d_{11} і D_{11} – менший і більший діаметри УЗ-концентратора, h_{11} і H_{11} довжини відповідних його циліндричних частин.

На рис. 6.17 приведена параметрична складальна одиниця УЗ-інструменту блоку дозування D , до складу якого входить прямокутна випромінююча пластина і потрібне число УЗ-вібраторів (див. рис. 6.15) з необхідними значеннями конструктивних параметрів.

У даному випадку комп'ютерна 3D-модель сформована для наступних величин: ширини $B_{пл} = 100$ мм, довжини $L_{пл} = 200$ мм, товщини $H_{пл} = 10$ мм пластини; довжини хвилі згинальних коливань у пластині $l_{ст} = 50$ мм; товщини ПЕП $H_6 = 2$ мм; товщини електродів $H_9 = 0,3$ мм; внутрішнього діаметра $d_{10} = 10$ мм частотознижуючих накладок та їх висоти $H_{10} = 54$ мм; діаметрів $d_{11} = 8$ мм і $D_{11} = 20$ мм УЗ-концентраторів та довжин $h_{11} = 16$ мм і $H_{11} = 59$ мм відповідних їх циліндричних частин.

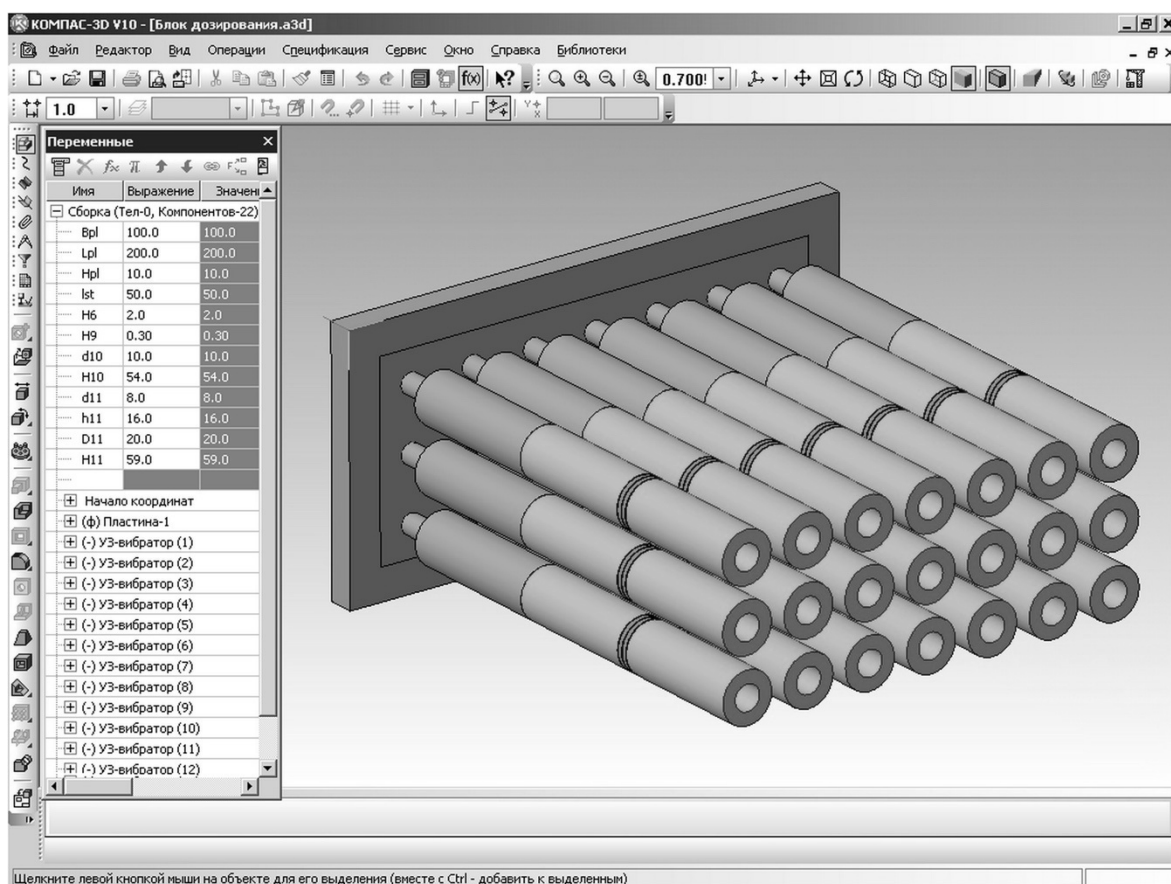


Рис. 6.17. Параметрична складальна одиниця блоку дозування D

Необхідні нові проектні варіанти УЗ-інструменту блоку дозування *Д* створюються належною зміною вхідних величин зазначених параметрів.

На закінчення зазначимо, що згідно з розглянутим підходом можна розробити й інші конструктивні схеми проаналізованого кавітаційного пристрою з прямокутною випромінюючою УЗ пластиною, наприклад, з використанням не тільки двоступеневих циліндричних УЗ-концентраторів, але і конічних, експонентних [70, 71], а також складених [74], що знаходять останнім часом широке застосування в технології формування реактопластичних КВМ [27].

7. ПРАКТИЧНА АДАПТАЦІЯ МЕТОДОЛОГІЇ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ОДЕРЖАННІ РЕАКТОПЛАСТИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНО-ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

У цьому розділі наведено три характерні приклади практичної адаптації застосовуваної методології СПГМ для моделювання конструктивно-технологічних параметрів базового процесу озвучування рідкого ПЗ, базового процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ПЗ, а також оптимізації параметрів складеного УЗ-дозуючого обладнання (для базового процесу дозованого нанесення) при одержанні високоміцних й бездефектних реактопластичних КВМ.

Перший приклад стосується моделювання технологічних параметрів базового процесу озвучування експонентними УЗ-концентраторами рідких ЕК при їх приготуванні як просочувальної композиції для ОВН [98, 99, 140].

Другий приклад розкриває сутність моделювання кінетичних параметрів базового процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ПЗ [128] на базі адекватної геометричної моделі мікроструктури ОВН та визначення її структурних параметрів [127], що також частково висвітлено в роботах [100 – 102].

Третій приклад описує моделювання конструктивно-технологічних параметрів складеного УЗ-дозуючого обладнання [651, 103 – 109], на основі чого було запатентовано ряд технічних рішень у вигляді корисних моделей [110 – 113]. Ці рішення базувались на аналізі та удосконаленні відомих зарубіжних технічних рішень [114 – 122], що стосувались виготовлення реактопластичних КВМ із застосуванням технічних засобів УЗ-кавітаційної обробки.

Окрім того, ряд отриманих результатів наведено у звітах про НДР [123–126], у свідоцтвах про реєстрацію авторського права на твір України та Росії [24, 108 – 109, 139. 150], а також у двох монографіях [27, 141] та в інших роботах [142 – 149].

7.1. Моделювання технологічних параметрів процесу озвучування рідких полімерних зв'язуючих

Як рідке реактопластичне ЕЗ у складі КВМ використовували ЕК у складі епоксидної смоли (ЕС) марки ЕД-20, що затверджували аміним твердником – діетилентриаміном ДЕТА. Вимірювали крайовий кут змочування Θ , змочувальну здатність $\sigma \cos \Theta$, динамічну в'язкість η ЕС, а також температуру склування T_c затверділого полімеру на основі ЕД-20 [98].

Рідкою ЕК на базі ЕД-20 надалі просочували армуючий ОВН джгутового типу на основі органоволокна, в результаті чого будували експериментальні кінетичні криві «вільного» просочування ОВН рідкими ЕЗ (залежність висоти підйому h ЕС по волокну в залежності від часу поздовжнього просочування t_{np}).

УЗ-дію здійснювали при частоті $f = (16 - 24)$ кГц, амплітуді $A = (20 - 100)$ мкм, інтенсивності $I = (5-15)$ Вт/см² і температурі $T = (50-70)$ °С протягом часу $\tau = (20 - 40)$ хв. При цьому для озвучування рідкого ЕЗ використовували експонентний УЗ-концентратор, оптимальні геометричні параметри якого було знайдено у підрозділі 3.2.

Експериментально-статистична обробка результатів вимірювань і методика та результати проведення оптимізації технологічних параметрів процесу озвучування рідких ЕК описані в роботах [27, 98, 131–133, 137–141].

У зв'язку з великою кількістю факторів для полегшення розрахунків була вибрана лінійна структура апроксимуючої математичної моделі 1-го порядку для кожної змінної, що має такий вигляд [27, 98, 141 – 143]:

$$Y(X) = c_0 + c_1 \cdot X_1 + c_2 \cdot X_2 + c_3 \cdot X_3 + c_4 \cdot X_4 + c_5 \cdot X_5, \quad (7.1)$$

де X_i – вхідні параметри (фактори), що означають відповідно:

$f_{\text{УЗ}}$ – частота УЗК, кГц (X_1);

A – амплітуда УЗК, мкм (X_2);

I – інтенсивність УЗК, Вт/см² (X_3);

T – температура УЗ-обробки, °С (X_4);

τ – час УЗ-обробки, хв (X_5);

Y_i – вихідні параметри, що уособлюють такі технологічні та експлуатаційні властивості:

η – динамічна в'язкість, Па·с (Y_1);

Θ_{\min} – мінімальне значення крайового кута змочування епоксидного олігомера (ЕС) по матеріалу наповнювача (підложки), ° (Y_2);

h_{\max} – максимальна висота підйому ЕС по волокнистому наповнювачу, мм (Y_3);

T_c – температура склування затверділого полімеру, °С (Y_4);

$c_0, c_1, c_2, \dots, c_5$ – константи рівняння (7.1), що підлягають визначенню.

У таблиці 7.1 наведені порівняльні результати вибірових експериментальних досліджень щодо технологічних та експлуатаційних властивостей ЕК, оброблених експонентним УЗ-концентратором [98, 138, 140 – 141].

Таблиця 7.1. Вплив параметрів УЗ-обробки експонентним концентратором на технологічні та експлуатаційні властивості ЕК у складі ЕД-20 + ДЕТА

Параметри УЗ-обробки					Властивості ЕС			
f , кГц	A , мкм	I , Вт/см ²	T , °С	τ , хв	η , Па·с	Θ_{min} , °	h_{max} , мм	T_c , °С
Вихідна ЕС марки ЕД-20								
–	–	–	–	–	0,78	30	0,90	104
УЗ обробка ЕС марки ЕД-20								
29	8	3	90	40	0,86	21	1,40	114
Віброакустична обробка ЕС марки ЕД-20								
17-24	50-120	15-30	70-90	30-45	0,840	19-20	2,00	118
УЗ-обробка ЕС марки ЕД-20 за розробленою технологією								
16	30	10	80	35	0,83	18,8	2,50	119,0
18	10	4	50	25	0,83	18,5	2,40	118,5
20	20	7	65	30	0,83	18,4	2,35	120,1
22	10	4	50	25	0,83	18,5	2,25	118,9
24	20	7	60	30	0,83	18,5	2,10	119,0

Отримані статистичним методом адекватні статистичні математичні моделі для кожної змінної при здійсненні фізичної модифікації ЕС і ЕК на їх основі мають такий вигляд [27, 98, 140 – 141]:

$$Y_1(X) = -8,835 - 0,000163 \cdot X_1 + 0,14015 \cdot X_2 - 1,3883 \cdot X_3 - 0,00035 \cdot X_4 + 0,5536 \cdot X_5; \quad (7.1.1)$$

$$Y_2(X) = 3,62683 - 0,001 \cdot X_1 + 0,04375 \cdot X_2 - 1,4462 \cdot X_3 + 0,01399 \cdot X_4 + 0,78039 \cdot X_5; \quad (7.1.2)$$

$$Y_3(X) = -7,5833 - 0,0384 \cdot X_1 + 0,11818 \cdot X_2 - 1,4262 \cdot X_3 + 0,01713 \cdot X_4 + 0,57288 \cdot X_5; \quad (7.1.3)$$

$$Y_4(X) = 77,284 - 0,0035 \cdot X_1 - 0,5634 \cdot X_2 - 1,8848 \cdot X_3 + 0,04167 \cdot X_4 + 2,11015 \cdot X_5. \quad (7.1.4)$$

Було встановлено [27, 98, 140 – 141], що попередня УЗ-обробка експонентним концентратором ЕС за ефективних режимних параметрів поліпшує їх технологічні та експлуатаційні характеристики (див. табл. 7.1). Ефективними режимними параметрами озвучування досліджуваних ЕС можуть вважатися наступні: частота $f = (16 - 24)$ кГц; амплітуда $A = (10 - 30)$ мкм; температура $T = (0 - 80)$ °С; час $\tau = (25 - 35)$ хв.

Крім того, отримані математичні залежності (7.1.1) – (7.1.4) дозволяють моделювати технологічні параметри процесу приготування (озвучування) просочувальних композицій для просочування ними ОВН, тобто оптимізувати відповідні технологічні режими формування реактопластичних КВМ на базі відповідних типів простих УЗ-концентраторів.

7.2. Моделювання кінетичних параметрів процесу поздовжнього просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими епоксидними зв'язуючими

Було встановлено [65, 86], що для практичних обчислень модельну функцію розподілу довжин екстхорд волокон, позначену на рис. 4.8 як (— —), яка мінімізує відхилення від експериментальних ординат (\circ), зручно (з точки зору отримання аналітичних розрахункових співвідношень) описувати в такому вигляді [68, 69]:

$$G(\ell) = \varphi(\rho) = \frac{c_k b^{(1/c_k)}}{\Gamma(1/c_k)} e^{-(b_k \rho^{c_k})}, \quad (7.2)$$

де b_k, c_k – додатні константи, що визначаються за умови найкращого наближення ординат теоретичної кривої (7.2) до експериментальних ординат;

$\Gamma(1/c_k)$ – гамма-функція Ейлера.

Для випадку (7.2) наведемо інші залежності [68, 69]. Так, зокрема, математичне очікування випадкової величини ρ має вигляд:

$$M(\rho) = \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho = \frac{\Gamma(2/c_k)}{b^{(1/c_k)} \cdot \Gamma(1/c_k)}, \quad (7.3)$$

Формула для пористості (4.17) прийме наступний вигляд [58, 59]:

$$\varepsilon = \frac{N^0 \pi \beta_o}{4} \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho = \frac{N^0 \pi \beta_o}{4} \cdot \frac{\Gamma(3/c_k)}{b^{(2/c_k)} \cdot \Gamma(1/c_k)}, \quad (7.4)$$

а формула для еквівалентного капілярного радіусу (4.19), згідно [58, 59], запишеться як:

$$r_{ef} = \frac{2}{\kappa_o} \left[\int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho / \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho \right] = \sqrt{2} \frac{\Gamma(1/c_k)}{b^{(1/c_k)} \cdot \Gamma(2/c_k)}. \quad (7.5)$$

Методику визначення r_{ef} для тканих структур, що є набагато простішим, ніж для випадку стохастично структурованих ОВН, можна знайти в роботах [27, 141].

7.2.1. Результати моделювання кінетичних параметрів процесу поздовжнього просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими епоксидними зв'язуючими

У роботах [128, 137–138] для випадку поздовжнього просочування ОВН рідкими ЕЗ було наведено наступне аналітичне рівняння для визначення часу поздовжнього просочування t_{np} :

$$t_{np} = \frac{\eta S_{mp} S_{num} \sigma \cos \theta}{\varepsilon^2 \gamma^2 g^2 r_{ef}} \left[\ln \left| \frac{\exp(1)}{1 - \varepsilon \gamma g h / S_{yo} \sigma \cos \theta} \right| - \frac{\varepsilon \gamma g h}{S_{yo} \sigma \cos \theta} \right], \quad (7.6)$$

яке після підстановки відповідних величин з урахуванням рівнянь (4.17) – (4.19) прийме такий вигляд:

$$t_{np} = \frac{\eta S_{mp} S_{num} \sigma \cos \theta}{\varepsilon^2 \gamma^2 g^2} \cdot \frac{b^{(1/c_k)} \cdot \Gamma(2/c_k)}{\sqrt{2} \cdot \Gamma(3/c_k)} \left[\ln \left| \frac{\exp(1)}{S_{num} \sigma \cos \theta} \right| + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon \gamma g h}{S_{num} \sigma \cos \theta} \right)^2 \right]. \quad (7.7)$$

Експериментальну перевірку модельного кінетичного рівняння (7.7) здійснювали на прикладі органоволокнистого джгута СВМ (діаметром 2,5 мм і довжиною 100 мм), який просочували ЕС марки ЕД-20 при температурі 40 °С і змінному зусиллі натягнення джгута N .

Виміряна реовіскозиметром динамічна в'язкість розчину ЕС при даній температурі склала 0,48 Па·с, а змочувальна здатність $\sigma \cos \theta$, обрахована за максимальною висотою підйому ПЗ по волокну під дією сил поверхневого натягнення за формулою [134]:

$$\sigma \cos \theta = \frac{h_{\infty} \gamma g R_k}{2}, \quad (7.8)$$

де h_{∞} – максимальна висота підйому (поздовжнього просочування) полімерної рідини;

R_k – радіус капіляра,

склала $\sigma \cos \theta = 1,9 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

На рис. 7.1 показані типові кінетичні криві «вільного» поздовжнього просочування ОВН джгутового типу рідким ПЗ, попередньо обробленим експонентним УЗ-концентратором. З рис. 7.1 видно добрий збіг експериментальних і розрахованих за рівнянням (7.7) значень.

Наведемо для кривої 3 ($N = 0,3$ Н/м) значення виразів (7.3) – (7.5) для модельної функції розподілу довжин екстхорд волокон, яка мінімізує відхилення від експериментальних ординат (○) – див. рис. 5.8.

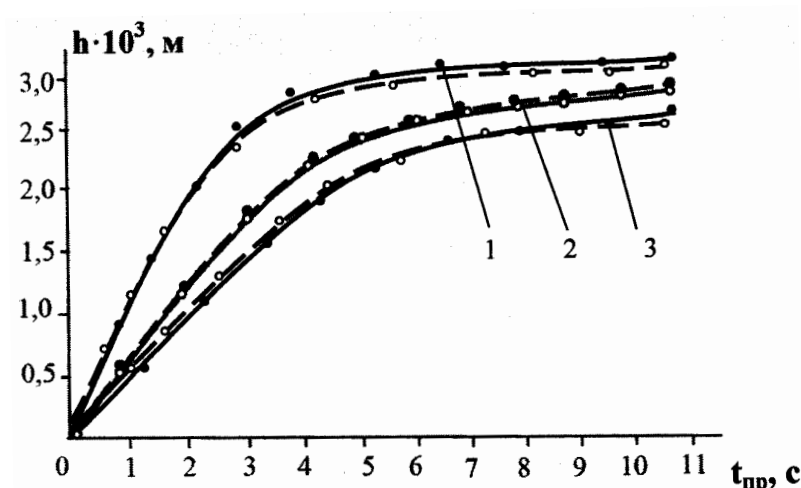


Рис. 7.1. Характерні кінетичні криві поздовжнього «вільного» просочування органоволокнистого джгута СВМ розчином ЕЗ на основі ЕС марки ЕД-20 при температурі 40 °С і за змінних зусиль натягнення N на одну нитку ОВН (значення зусиль натягнення вказані біля кривих):

1 – $N = 0,05$ Н/м;

2 – $N = 0,20$ Н/м;

3 – $N = 0,3$ Н/м;

(●) – теоретична крива, побудована за рівнянням (7.7);

(○) – експериментальні значення

Так, при кількості замірів відстаней між волокнами $N^o = 2500$ у площині шліфу КВМ (див. рис. 4.1) і при значеннях $\beta_o = 1,1$, $\kappa_o \approx \sqrt{2}$ згідно [1, 30] математичне очікування (7.3) дорівнює $M(\rho) = 8,158$ мкм.

При цьому в рівнянні (7.2) стали $b_k = 0,129$, $c_k = 0,9812$, за вирвзом (7.4) пористість $\varepsilon = 0,28$ (тобто коефіцієнт армування або об'ємний вміст ОВН у структурі композиту складає $\xi_a = 1 - \varepsilon = 0,72$), а за виразом (7.5) ефективний (еквівалентний) капілярний радіус $r_{ef} = \bar{\rho} = 5,96$ мкм ≈ 6 мкм.

Для інших наведених на рис. 7.1 кривих 1 – 2 та для оброблених мікрошліфів при зазначених зусиллях натягнення, розраховані згідно рівнянь (7.3) – (7.5) значення пористості ε , ефективного капілярного радіуса r_{ef} , а також об'ємного вмісту просочуваного ОВН у геометричній моделі мікроструктури композиту $\xi_a = 1 - \varepsilon$, наведені у табл. 7.2.

Таблиця 7.2. Значення розрахованих параметрів геометричної моделі мікроструктури просочуваних ОВН у вигляді рівінгу у залежності від зусилля натягнення N

Параметр	$N = 0,05$ Н/м (крива 1)	$N = 0,20$ Н/м (крива 2)	$N = 0,30$ Н/м (крива 3)
ефективний капілярний радіус $r_{ef} \cdot 10^6$, м	6,16	6,08	5,96
пористість ε	0,295	0,286	0,28
об'ємний вміст ОВН ξ_a	0,707	0,714	0,72

Вищенаведені результати моделювання параметрів базового процесу «вільного» просочування рідкими ПЗ дають змогу оптимізувати геометричні параметри змотувального й просочувального обладнання в залежності від величини зусилля натягнення N (й відповідно, схеми армування) ОВН при просочуванні.

Для знаходження габаритів просочувальної ванни (довжини і висоти) бажано також оцінити максимальну висоту та швидкість поздовжнього «вільного» просочування ОВН рідким ПЗ при заданій температурі просочування.

Наприклад, відповідно до робіт [100, 128, 137–141], максимальна висота поздовжнього просочування h_{∞} та швидкість просочування v_{np} (до моменту настання насичення просочуваного ОВН) оцінюються за допомогою рівнянь (7.9) та (7.10):

$$h_{\infty} = \frac{S_{num} \sigma \cos \theta}{\gamma g \varepsilon}, \quad (7.9)$$

$$v_{np} = \frac{dh}{dt} = \frac{r_{ef} \sigma \cos \theta}{4\eta h}. \quad (7.10)$$

Зокрема, для експериментальної кінетичної кривої «вільного» просочування 3 (рис. 7.2) вони виявились такими: $h_{\infty} = 3,15 \cdot 10^{-3}$ м; $v_{np} = 1,03 \cdot 10^{-3}$ м/с.

7.3. Моделювання конструктивно-технологічних параметрів складеного ультразвукового дозуючого пристрою

Моделювання конструктивно-технологічних параметрів УЗ-дозуючого обладнання здійснювали відповідно до підходу, описаного в роботах [61, 138]. Підведення акустичної енергії до дозувального кавітаційного апарата на базі прямокутної випромінюючої пластини 1 (рис. 7.1 – рис. 7.3) здійснювали за допомогою ряду складених випромінювачів УЗ 5 на базі ПЕП, які були зафіксовані щільно до пластини за допомогою нарізеного з'єднання.

Експериментально було знайдено [137–141], що для досягнення ефективних результатів при одержанні реактопластичних КВМ, зокрема, при контактній УЗ-обробці просочуваної ЕЗ склотканини ЕЗ-200П шириною 1120 мм, необхідно мати такі значення технологічних параметрів кавітаційної обробки:

частота УЗК $f_{уз} = f_{ст}$ (16 – 24) кГц (для розрахунку приймаємо $f_{уз} = 22$ кГц);
амплітуда УЗК (3 – 5) мкм; інтенсивність УЗК (2 – 4) Вт/см².

Вибрана товщина випромінюючої пластини 1 (рис. 7.1) складає $H_{nl} = 10$ мм = 0,01 м, а її матеріал – нержавіюча сталь марки 1ХН18Н9Т з наступними характеристиками: швидкість звуку $c_{nl} = c_4 = 5,2 \cdot 10^3$ м/с; модуль пружності щодо розтягання $E_4 = 20,5 \cdot 10^4$ МПа.

Обчислена за формулою (7.5) довжина згинальних коливань пластини при $\lambda_{\text{ст}} = 4,750$ ($n_k = 1$) становить: $\ell_{\text{ст}} = 0,05$ м. Тоді максимальне число складених ПЕП, які можна встановити вздовж випромінюючої пластини довжиною $L_{\text{пл}} = 600$ мм = 0,6 м, дорівнює:

$$N = 2N_L - 1 = 2 \cdot 12 - 1 = 23,$$

а максимальна кількість ПЕП M , що можна встановити вздовж ширини $B_{\text{пл}} = 150$ мм = 0,15 м досліджуваної випромінюючої пластини, дорівнює:

$$M = 2M_B - 1 = 2 \cdot 3 - 1 = 5.$$

Для матеріалу частотознижуючих накладок 8 і 10 (тобто демпферів – див. рис. 7.3) на базі сталі 40Х13 маємо: швидкість звуку $c_1 = 5,2 \cdot 10^3$ м/с; модуль пружності $E_1 = 2,05 \cdot 10^5$ МПа; вибраний зовнішній діаметр частотознижуючих накладок 8, 10 [4 – 5] складає 40,2 мм = 0,042 м; їх внутрішній діаметр – 0,012 м.

Задамо конструктивно необхідне значення розміру товщини a_2 для випадку збирання на базі чотирьох п'єзокерамічних кілець 6 марки 841 з зовнішнім діаметром $d_6 = 38$ мм, а саме: $a_2 = 25,6$ мм = 0,0256 м.

Тоді швидкість поширення звуку в матеріалі кільця 6 дорівнює: $c_2 = 2,5 \cdot 10^3$ м/с; модуль пружності $E_2 = 6,35 \cdot 10^4$ МПа. Питому акустичну потужність для п'єзокераміки при частоті УЗК (18 – 22) кГц зазвичай приймають рівною (1 – 3) Вт/см².

Значення товщини a_1 частотознижуючих накладок 8 і 10, знайдене за формулою (7.8), склало 15,75 мм, значення довжини ступені a_3 ділянки ступені ℓ більшого діаметра концентратора згідно (7.9) склало 55,93 мм.

Порівняльний аналіз розрахункових параметрів, отриманих відповідно до описаної методики, і експериментальних параметрів, отриманих на виготовленому й впровадженому в технологічний процес одержання КВМ складеному кавітаційному апараті з випромінюючою прямокутною пластиною, що здійснює згинальні коливання, підтверджує, що похибка наведеної удосконаленої методики не перевищує 15 %.

Розроблена удосконалена методика та реалізуючий її алгоритм дають можливість створювати широку гаму типорозмірів складених кавітаційних апаратів для різних розмірів випромінюючої пластини й різних технологічних умов [61, 138, 141].

При цьому конструкція УЗ-кавітаторів-дозаторів розглянутого типу дозволяє шляхом варіювання кількості секцій з випромінювачами на базі ПЕП змінювати потужність апаратів у широких межах. Експлуатація експериментальних зразків дослідженого типу УЗ-кавітаторів-дозаторів різних потужностей підтвердила їхню високу ефективність, надійність та легкість в обслуговуванні.

Також представляє інтерес проведення порівняльного аналізу структури орієнтованих КВМ, просочених рідкими ЕЗ при низькочастотній УЗ-дії, що описується нижче.

7.4. Порівняльний аналіз мікроструктури орієнтованих волокнистих наповнювачів, просочених рідкими епоксидними зв'язуючими за ультразвукової дії

На рис. 4.1 була наведена типова фотографія мікрошліфу поперечного перерізу орієнтованого епоксидного склопластика, одержаного за «вільного» просочування, тобто без інтенсифікуючої УЗ-дії.

Проведені дослідження свідчать про підвищення експлуатаційних властивостей затверділої полімерної матриці, у тому числі покращення її змочувальної здатності (див. підрозділ 7.1).

Внаслідок цього можна очікувати й на поліпшення експлуатаційних властивостей КВМ на її основі, про що опосередковано може свідчити розподіл волокон у структурі поперечного шліфу КВМ, одержаного за ефективних режимів УЗ-обробки (див. рис. 7.2).



Рис. 7.2. Типова фотографія мікрошліфу поперечного перерізу орієнтованого епоксидного органопластика, одержаного за ефективних режимів низькочастотної УЗ-дії із застосуванням експонентного концентратора.
Збільшення 1200 х

Порівнюючи якісно обидва рисунки (рис. 7.1 і рис. 7.2), можна помітити, що в обробленому низькочастотним УЗ затверділому КВМ практично відсутні сторонні включення (у т.ч. повітряні пустоти) між волокнами, а самі волокна розподілені практично регулярно.

Це свідчить на користь зробленого припущення про доцільність застосування апроксимуючої подвійно-періодичної структурної моделі ОВН (див. підрозділ 7.2) для прогнозування технологічних параметрів процесу як «вільного», так і УЗ-просочування.

Знайдені для цього випадку сталі теоретичного рівняння (7.2) становлять: $b_k = 0,125$, $c_k = 0,992$, пористість (7.4) $\varepsilon = 0,27$ (тобто коефіцієнт армування чи об'ємний вміст ОВН у структурі КВМ складає $\xi_a = 1 - \varepsilon = 0,73$), а ефективний (еквівалентний) капілярний радіус (7.5) $r_{ef} = \bar{\rho} = 5,77 \text{ мкм} \approx 5,8 \text{ мкм}$.

На рис. 7.3 показана експериментальна гістограма, а також теоретична крива розподілу довжин екстхорд суміжних волокон (кіл) (7.2) $f_\Delta(z) = G(l)$ в структурі КВМ, що отримані за ефективних режимів низькочастотної УЗ-дії експонентним концентратором на рідкі ЕК.

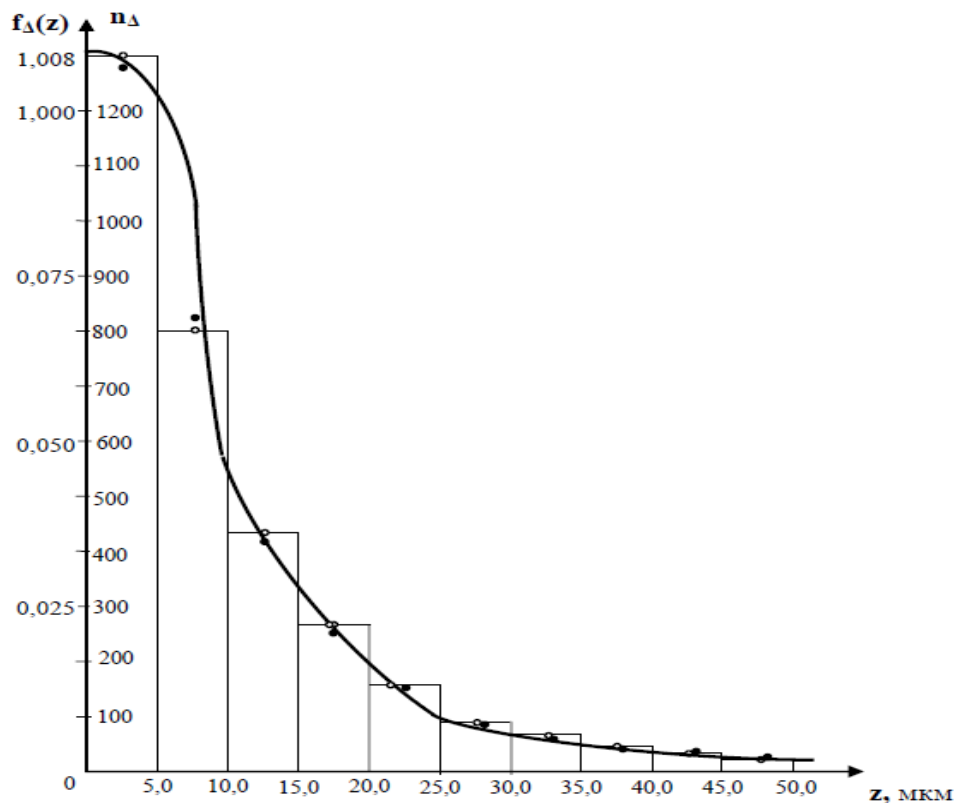


Рис. 7.3. Типова експериментальна гістограма і криві розподілу довжин екстхорд суміжних волокон (кіл) $f_\Delta(z)$ у структурі орієнтованих КВМ, одержаних за ефективних режимів низькочастотної УЗ-дії:

- (○) – експериментальні ординати;
- (●) – теоретичний розподіл (7.2);
- n_Δ – кількість замірів

Порівнюючи обидві гістограми (рис.5.8 і рис. 7.3), можна відзначити, що у випадку УЗ-обробки рідких ЕК експонентним концентратором за ефективних режимів кількість експериментальних ординат (\circ) (висота прямокутників гістограм) з однаковими (інтервальними) значеннями z є трохи більшими у порівнянні з ЕК, не оброблених УЗ. Це, у свою чергу, свідчить про зменшення вмісту повітряних включень у структурі затверділого КВМ, обробленого УЗ, а також про більш рівномірний розподіл волокон у структурі композиту.

Було встановлено, що при заданих параметрах $\alpha_0 = R_0^2/D_0 = 8$, $\lambda_0 = R_0/D_0 = 1$, де R_0 – середній радіус волокон у структурі орієнтованих КВМ, а D_0 – дисперсія відхилення від середнього випадкового радіусу r , оптимальне значення Δ , при якому функція розподілу довжин екстхорд суміжних кіл $f_\Delta(z)$ (7.2) найбільш близька до експериментальної гістограми довжин суміжних екстхорд волокон (див. рис. 7.3), досягається при $\Delta = 12,4$.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Що таке епоксидні олігомери? І чому вони та композиції на їх основі широко використовуються в різних галузях промисловості?
2. Наведіть коротку класифікацію і типові склади епоксидних з'єднань.
3. З яких основних операцій складається типовий технологічний цикл одержання орієнтованих реактопластичних волокнистих композиційних матеріалів?
4. Що таке препрег? Проаналізуйте особливості технології одержання препрегів.
5. Які існують методи модифікації рідких епоксидних композицій?
6. Проаналізуйте сутність хімічної модифікації епоксидних композицій.
7. Проаналізуйте сутність фізико-хімічної модифікації епоксидних композицій.
8. Проаналізуйте сутність фізичної модифікації епоксидних полімерів.
9. Обґрунтуйте фактори, що сприяють підвищенню ефективності ультразвукової модифікації рідких реактопластичних композицій.
10. Проаналізуйте передумови до геометричного моделювання базового процесу «вільного» просочування.
11. Обґрунтуйте перспективність застосування УЗ для базових процесів приготування полімерного зв'язуючого, просочування та дозованого нанесення.
12. Проаналізуйте ефективні засоби ультразвукової кавітаційної обробки з випромінюючою пластиною.
13. Охарактеризуйте доцільність застосування методології структурно-параметричного геометричного моделювання для оптимізації технологічних процесів та обладнання.
14. Обґрунтуйте адаптацію базових принципів структурно-параметричного геометричного моделювання до вирішення задач проектування технологічного інструменту.
15. Проаналізуйте особливості підходів до геометричного моделювання процесів та обладнання для виготовлення реактопластичних КВМ.
16. Охарактеризуйте узагальнену схему інноваційного одержання реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ.
17. Проаналізуйте розбиття схеми інноваційного одержання КВМ на окремі структуровані технологічні блоки.
18. Охарактеризуйте технологію одержання реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ як об'єкт структурно-параметричного геометричного моделювання.
19. Опишіть структурно-параметричне геометричне моделювання формоутворювальних елементів, що входять до блоку «вільного» просочування?
20. Опишіть структурно-параметричне геометричне моделювання формоутворювальних елементів, що входять до блоку УЗ-обробки епоксидної смоли.

21. У чому полягає структурно-параметричне геометричне моделювання формоутворювальних елементів, що входять до блоку дозування?

22. У чому полягають конструктивно-технологічні особливості будови хвилеводів і концентраторів УЗ?

23. Проаналізуйте сутність геометричного моделювання простих акустичних концентраторів УЗ та їх вплив на технологію одержання КВМ.

24. Опишіть геометричну модель мікроструктури орієнтованих композиційно-волокнистих матеріалів та її вплив на технологію одержання КВМ.

25. У чому полягає комп'ютерне моделювання базового процесу «вільного» просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими?

26. Опишіть математичні співвідношення для визначення структурних параметрів адекватної геометричної моделі орієнтованих волокнистих наповнювачів.

27. Охарактеризуйте методику моделювання параметрів базового процесу «вільного» просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими.

28. Охарактеризуйте особливості схеми розміщення елементів складеного ультразвукового дозуючого кавітаційного пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною.

29. Проаналізуйте удосконалену методику та послідовність реалізації алгоритму варіантного структурно-параметричного геометричного конструювання складеного ультразвукового дозуючого пристрою.

30. Проаналізуйте доцільність оптимізації конструкторсько-технологічних параметрів складеного ультразвукового дозуючого пристрою з точки зору технології.

31. У чому полягає сутність моделювання технологічних параметрів процесу озвучування рідких полімерних зв'язуючих?

32. У чому полягає сутність моделювання кінетичних параметрів процесу поздовжнього просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими епоксидними зв'язуючими?

33. Проаналізуйте результати моделювання кінетичних параметрів процесу поздовжнього просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими епоксидними зв'язуючими з точки зору оптимізації параметрів просочувального обладнання.

34. Проаналізуйте результати моделювання конструктивно-технологічних параметрів складеного ультразвукового дозуючого пристрою.

35. Проведіть порівняльний аналіз мікроструктури орієнтованих волокнистих наповнювачів, просочених рідкими епоксидними зв'язуючими за ультразвукової дії і за відсутності такої дії.

36. Проаналізуйте типові схеми процесу «вільного» просочування.

37. Опишіть алгоритм знаходження ефективного капілярного радіуса для випадку просочення тканих структур.

38. Назвіть послідовність практичної реалізації методики аналітичного розрахунку резонансних акустичних розмірів складеного ультразвукового дозуючого обладнання.

39. Охарактеризуйте методику визначення контрольованих технологічних параметрів складеного ультразвукового кавітаційного апарату з випромінюючою пластиною.

40. Охарактеризуйте використання методу експертних оцінок для оптимізації вибору конструктивно-технологічних параметрів концентраторів ультразвуку.

41. Проаналізуйте особливості реалізації розроблених технологічних засад і обладнання для процесів просочування волокнистих наповнювачів та дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих із застосуванням ультразвукової модифікації.

42. Обґрунтуйте переваги розроблених технологічних засад для процесів просочування волокнистих наповнювачів і дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих на просочені волокнисті наповнювачі із застосуванням ультразвукової модифікації.

43. У чому полягає оптимізація параметрів процесу дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих на склоткані наповнювачі з використанням ультразвуку?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Цыплаков О. Г. Научные основы технологии композиционно-волокнуистых материалов. Ч.1 / Цыплаков О. Г. – Пермь, 1974. – 317с.
2. Основы технологии переработки пластмасс / Под ред. В. Н. Кулезнева и В. К. Гусева. – М.: Химия, 1995. – 528 с.
3. Коновалов В.И. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / В. И. Коновалов, А. М. Коваль. – М.: Химия, 1989. – 224 с.
4. Ультразвуковая технология / Агранат Б. А., Башкиров В. И., Китайгородский Ю. И., Хавский Н. Н.; [под ред. проф. Аграната Б. А.]. — М.: Металлургия, 1974. — 504 с.
5. Гершгал Д. А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д. А. Гершгал, В. М. Фридман. – М., Энергия, 1976. – 319 с.
6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой. – М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 192 с.
7. Новицкий Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Новицкий Б. Г. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
8. Прохоренко П. П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П. П. Прохоренко, Н. В. Дежкунов, Г. Е. Коновалов. – Минск: Тэхніка, 1981. – 135 с.
9. Ванін В.В. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Вип. 23. – Харків: ХДУХТ, 2009. – С. 42-48.
10. Никульчев Е. В. Геометрический подход к моделированию нелинейных систем по экспериментальным данным: монография / Никульчев Е. В. — М.: МГУП, 2007. — 162 с.
11. Черніков О.В. Основні напрямки геометричного та комп'ютерного моделювання фізичних та технологічних процесів // Геометричне та комп'ютерне моделювання: Зб. наук. праць – Харків: ХДУХТ, 2006. – Вип. 19. – С. 168 – 182.
12. Черніков О.В. Геометричне та комп'ютерне моделювання динаміки процесів зміни об'єктів під впливом заданих чинників (на прикладі фільтрування): автореферат дис. на здобуття наук. ступ. докт. техн. наук: спец. 05.01.01 – «Прикладна геометрія, інженерна графіка» / О.В. Черніков. – К.: КНУБА, 2008. – 36 с.
13. Пантелеев, В.А. Статистические основы моделирования [текст] : монография / В.А.Пантелеев. – Ухта: УГТУ, 2008. – 116 с.
14. Статюха Г.О. Інтелектуальні системи прийняття рішень при дослідженні та проектуванні хіміко-технологічних процесів [у 2-х кн.] / Г.О. Статюха, Ю.О. Безносик, Л.М. Бугаєва. — К.: Політехніка, 2005. – 416 с.
15. Ванин Г. А. Основы статистической теории волокнуистых сред / Г. А. Ванин // Механика композитных материалов. – 1982. – № 6. – С. 1043–1051.
16. Колосов О.Є. Математичне моделювання базових процесів виготовлення полімерних композиційних матеріалів із застосуванням

ультразвукової модифікації / О.Є. Колосов, В.І.Сівецький, Є.М. Панов та ін. – К.: ВД «Едельвейс», 2012. – 268 с.

17. Федоткин И. М. Интенсификация технологических процессов / И. М. Федоткин. — К.: Вища школа, 1979. — 347 с.

18. Федоткин И. М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть II / И. М. Федоткин, И. С. Гулый. – К.: АО "ОКО", 2000. — 898 с.

19. Колосов О.Є. Проектування конструктивно-технологічних параметрів вузлів просочування і дозованого нанесення просочувально-сушильного комплексу, призначеного для одержання намоточних виробів з волокнистих реактопластичних полімерних композитів / О.Є.Колосов, В.І.Сівецький, В.С.Кривошеев, О.П. Колосова // Тез. доп. III міжнар. наук.-техн. конф. «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів ТК-2014». – Луцьк, 2014. — С. 37–38.

20. Колосов А.Е. Подход к проектированию конструктивно-технологических параметров технических средств, предназначенных для получения реактопластичных композиционно-волокнистых материалов, на базе структурно-параметрического моделирования / А.Е.Колосов, Г.А.Вирченко, Е.П. Колосова // Збірник доп. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та науковців каф. ХПСМ інж.-хімічн. факультету НТУУ «КПІ» «Ресурсоенергоєфективні технології і обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів». – Київ, 2014. — С. 9 – 11.

21. Колосов О.Є. Методологічний підхід до конструкторсько-технологічного проектування ефективних технічних засобів для одержання реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів на базі структурно-параметричного моделювання / О.Є.Колосов, Г.А.Вірченко, О.П.Колосова, Г.І. Вірченко // Тез. доп. IV Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених». – Київ, 2015. — С. 111–115.

22. Колосова О.П. Структурно-параметричне моделювання — ефективний напрям конструкторсько-технологічного проектування технічних засобів для одержання реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів / О.П. Колосова, В.В. Ванін, О.Є. Колосов, Г.І. Вірченко // Тез. доп. XVI міжнар. наук.-техн. конференції "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта". – Одеса, 2015. — С. 154-158.

23. Колосова О.П. Математичне та структурно-параметричне моделювання технічних засобів для одержання реактопластичних композиційних матеріалів / О.П. Колосова // Тез. доп. Всеукр. наук.-практ. конф. «Сучасні технології промислового комплексу» (СТПК-2015). – Херсон, 2015. — С. 157.

24. Колосов А.Е. Моделирование технологических процессов и оборудования для формования делий из полимерных композиционных материалов / А.Е.Колосов, В.И.Сивецкий, Е.П. Колосова и др. // Свидетельство

о депонировании произведения в БД РАО «Копирус» (г. Москва) №014-003247 от 10.04.2014г. – ISBN 978-5-4472-3200-9.

25. Колосов А.Е. Технология формования изделий из полимерных композиционных материалов с применением интенсифицирующих методов / А.Е.Колосов, В.И.Сивецкий, Е.П. Колосова и др. // Свидетельство о депонировании произведения в БД РАО «Копирус» (г. Москва) №014-003246 от 10.04.2014г. – ISBN 978-5-4472-3199-6.

26. Kolosov A.E. Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling / A. E. Kolosov, G. A. Virchenko, E. P. Kolosova, G. I. Virchenko // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – №7. – P.p. 41 – 46.

27. Колосов О.Є. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку: [монографія] / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, О.П. Колосова. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – 295 с.

28. Аксельруд Г. А. Введение в капиллярно-химическую технологию / Г. А. Аксельруд, М. А. Альтшулер. – М.: Химия, 1983. – 264 с.

29. Воюцкий С. С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых материалов дисперсиями полимеров / Воюцкий С. С. – Л.: Химия, 1969. – 336 с.

30. Чизмаджев Ю. А. Макрокинетика процессов в пористых средах / Ю. А. Чизмаджев, В. С. Маркин, М. Р. Тарасевич и др. – М.: Наука, 1971. – 364 с.

31. Сыс В. В. Оценка распределения межволоконных пор по размерам методом моделирования структуры нити / В.В. Сыс // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №6/10 (66). – С. 47–51.

32. Залевський С.В. Геометричне моделювання тканинних наповнювачів текстолітових конструкцій технічних виробів : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.01.01 - прикладна геометрія, інженерна графіка / С.В. Залевський; Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. МОНУ. – К.: 2011. – 23 с.

33. Ванін В.В. Дослідження траєкторії руху розкладальника стрічки в процесі навивки виробів з композитів. / В.В. Ванін, Г.П. Грязнова // Прикладна геометрія та інженерна графіка. - 2013. - Вип. 91. - . С.75-78.

34. Ванін В.В. Дослідження форми поверхні полімерної стрічки при виробництві композитних деталей / В.В. Ванін, Г.П. Грязнова // Сучасні проблеми моделювання. – 2014. – №3. – С. 34 – 38.

35. Ванин В.В. Структурно-параметричний метод для моделювання технологічного процесу створення виробів з композитів / В.В. Ванин, Г.П. Грязнова, А.Г. Допира, С.Л. Шамбина // SWorld [ел. ресурс]. – 16–26 December, 2014. Режим доступу: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-414/applied-geometry-engineering-graphics-ergonomics-and-safety-of-life-414/23604-414-053>

36. Руденко С. Ю. Геометричне моделювання фасонних поверхонь обертання, зміцнених намотуванням нитки: автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка / С. Ю. Руденко; Нац. ун-т цив. зах. ДСУНС. – Х., 2013. – 24 с

37. Куценко Л.М. Поверхні обертання зі змінної уздовж осі кривиною меридіанів та їх зміцнення шляхом намотування кевларової нитки / Л.М. Куценко, С.Ю. Руденко // Міжвузівський збірник "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – Вип. 6. – Луцьк: ЛНТУ, 2011 р. – С. 148-153.

38. Аюшев Т.В. Геометрические вопросы адаптивной технологии изготовления конструкций намоткой из волокнистых композиционных материалов / Т.В. Аюшев. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2005. – 212 с.

39. Калинин В. А. Теоретические основы геометрического моделирования процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов: автореф. дис. доктора техн. наук: 05.01.01–инженерная геометрия и компьютерная графика / В.А. Калинин; Моск. гос. авиац. ин-т. – М., 1997. – 49 с.

40. Битюков Ю.И. Геометрическое моделирование технологических процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов: автореф. дис. докт. техн. наук : 05.01.01 – инженерная геометрия и компьютерная графика / Ю.И. Битюков; Моск. гос. авиац. ин-т. – М., 2010. – 34 с.

41. Шалун Г. Б. Слоистые пластики / Г.Б. Шалун, Е. М. Сурженко. – Л.: Химия, 1978. – 232 с.

42. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция / Маргулис М. А. — М.: Химия, 1986. – 288 с.

43. <http://u-sonic.ru>.

44. Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электротехнологические установки. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 208 С.

45. А.с. № 902854 СССР, МКИ³ В05С3/12. Устройство для пропитки волокнистых армирующих материалов связующим / В. Г. Гапоненко, А. Н. Ткачев, В. П. Грузский и др.(СССР). – №2939883/23-05; заявл. 03.08.1980; опубл. 07.02.1982, Бюл. № 5.

46. А.С. СССР 1781054, МКИ⁵ В29В15/12. Способ пропитки и дозированного нанесения связующего на длинномерный волокнистый материал / А. Е. Колосов, В. Д. Конев, В. Г. Огоньков и др. (СССР). – №4896412/05; заявл. 13.11.1990; Опубл. 15.12.1992, Бюл. №46.

47. Деклар. пат. на винах. № 42617А Україна, МПК⁷ В29В15/10. Пристрій для просочення і дозованого нанесення зв'язуючого на довгомірний волокнистий матеріал / Кудряченко В. В., Федоткін І. М., Колосов О. Є. №2001053300; заявл. 16.05.2001; опубл. 15.10.2001, Бюл. №9.

48. Ванін В.В. Структурно-параметричний підхід як методологія узагальнення каркасного, поверхневого та об'ємного геометричного моделювання / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко // Праці Тавр. держ. агротех. університету. – Вип. 4. Прикл. геом. та інж. граф. – Т. 46. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – С. 42-46.

49. Ванін В.В. Применение комбинаторно-вариационного подхода для компьютерного геометрического моделирования инженерных конструкций и

сооружений / В.В. Ванін, С.Л. Шамбіна, В.Г. Вирченко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – №4. – М.: РУДН, 2013. – С. 3–8.

50. Вирченко В.Г. Модульное вариантное геометрическое моделирование сложных технических объектов / С.Л. Шамбіна, В.Г. Вирченко // Вестник Российского университета дружбы народов. Инженерные исследования: науч. журнал. – 2013. – №2. – М.: ИПК РУДН. – С. 5 – 8.

51. Virchenko V.G. Computer combinatorial-variation geometric modeling of engineering objects / V.G. Virchenko, I.P. Taras // The Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara, Transactions on Hydrotechnics. – Tom 58(72), Fascicola suplimentara, 2013. – P. 173 – 176.

52. Ванін В.В. Структурно-параметричні моделі як засіб інтеграції автоматизованого проектування сучасного літака / В.В. Ванін, Г.А. Вирченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Вип. 3 (50). – Херсон: ХНТУ, 2014. – С. 571 –574.

53. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи [текст] / Е. Кикучи [пер. с англ.: под ред. И.Л. Голяминой]. – М.: Мир, 1972. – 424 с.

54. Кумабэ Д. Вибрационное резание [текст] / Д. Кумабэ [пер. с япон. Л. Масленникова / под ред. Портнова И.И., Белова В.В.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

55. Основы физики и техники ультразвука [текст] / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский, Г.И. Эскин. – М.: Высш. школа, 1987. – 352 с.

56. Хмелев В.Н. Ультразвуковые multifunctional и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве [текст] / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков и др. [под ред. проф. В.Н. Хмелева]. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 400 с.

57. Бржозовский Б.М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении [текст] / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. – Саратов: СГТУ, 2009. – 348 с.

58. Абакумов В.Г. К вопросу о выборе эффективных конфигураций составных концентраторов акустической энергии [текст] / В.Г. Абакумов, А.Г. Трапезон, К.А. Трапезон // Акустичний вісник. – 2009. – Т.12. – №4. – С. 3-9.

59. Бекренев Н.В. Оптимизация конструкций трансформаторов скорости ультразвукового оборудования на основе 3-D моделирования (постановка задачи) [текст] / Н.В. Бекренев, А.П. Петровский, Т.Ю. Чиндыкова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (49). – С. 77-83.

60. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях [текст] / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: ВПЦ «Київ. ун-т», 2007. – 244 с.

61. Kolosov A.E. Procedure for analysis of ultrasonic cavitator with radiative plate / A.E. Kolosov, V.I. Sivetskii, E.P. Kolosova, E.A. Lugovskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2013. – Vol. 48, Issue 11-12. – P. 662-672.

62. Ванін В.В. Структурно-параметричні геометричні моделі як інваріантна складова комп'ютерних інформаційних технологій підтримки життєвого циклу

виробів машинобудування [текст] / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко, В.В. Ванін // Праці Тавр. держ. агротех. академії. – Вип. 4. Прикл. геометрія та інженерна графіка: зб. наук. праць. – Т. 36. – Мелітополь: ТДАТА, 2007. – С. 16-21.

63. Вірченко Г.А. Структурно-параметричний підхід як загальна методологія комп'ютерного геометричного моделювання об'єктів машинобудування [Текст] / Г.А. Вірченко // Прикладна геометрія та інженерна графіка: наук.-техн. зб. – Вип. 83. – К.: КНУБА, 2010. – С. 146-152.

64. Ванін В.В. Продукція машинобудування та процеси її виготовлення як об'єкти структурно-параметричного геометричного моделювання [текст] / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко // Прикладна геометрія та інженерна графіка: наук.-техн. зб. – Вип. 84. – К.: КНУБА, 2010. – С. 28-32.

65. Иванченко Ф. К. Принципы построения модели структуры в теории армированных композиционных сред / Ф. К. Иванченко, В. В. Клявлин, А. Е. Колосов // Докл. АН УССР. – Сер. А. – 1987. – № 8. – С. 25–29.

66. Колосов А. Е. Детерминирование параметров геометрической модели структуры ориентированно армированных волокнистых композитов / А. Е. Колосов, В. В. Клявлин // Механика композит. материалов. – 1987. – №6. – С. 990–998.

67. Колосов А. Е. Некоторые аспекты детерминирования адекватной модели структуры ориентированных волокнистых композитов / А. Е. Колосов, В. В. Клявлин // Механика композит. материалов. – 1988. – №6. – С.1012–1019.

68. Колосов О. Є. Аналіз структурних моделей капілярно-пористих тіл / О. Є. Колосов // Вісник НТУУ КПІ. Сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2010. – № 1 (5). – С. 13–16.

69. Колосов О. Є. До вибору фізичної моделі капілярно-пористого середовища на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів / О. Є. Колосов // Вісник НТУУ КПІ. Сер. «Машинобудування». – 2010. – №59. – С. 96 – 101.

70. Вірченко Г.А. Застосування структурно-параметричного геометричного моделювання для оптимізації конструкції хвилеводів і концентраторів ультразвукового технологічного обладнання / Г.А.Вірченко, О.П.Колосова // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2014. – №4 (51). – С. 145 – 149.

71. Вірченко Г.А. Варіантне параметричне конструювання акустичних концентраторів / Г.А.Вірченко, О.П.Колосова // Вісник НТУУ «КПІ», Сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2014. – №2(13). – С. 8 –12.

72. Колосова О.П. Перспективні напрями досліджень геометричного моделювання технічних засобів для ультразвукового одержання волокнистонаповнених реактопластичних композитів / О.П. Колосова // Тез. доп. II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». – Київ, 2015. – С. 77–79.

73. Колосова О.П. Оптимизация конструкций одноволновых составных ультразвуковых вибраторов на базе пьезоэлектрических преобразователей на базе структурно-параметрического моделирования / О.П. Колосова // Збірник доп. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та науковців каф. ХПСМ інж.-хім. факультету НТУУ «КПІ» «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». – Київ, 2015. — С. 24–28.
74. Вірченко Г.І. Застосування структурно-параметричних геометричних моделей для варіантного конструювання складених акустичних концентраторів / Г.І. Вірченко, О.О.Голова, О.П.Колосова, С.Л. Шамбіна // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – №3 (54). – С. 547 – 550.
75. Колосова О.П. Методика оптимизации конструкций одноволновых составных ультразвуковых вибраторов на базе структурно-параметрического моделирования / Колосова О.П. // Тез. доп. міжнар.наук.-практ. конф. «Проблеми механіки та фізико-хімії конденсованого стану речовини». – Миколаїв, 2015. – С. 205 – 210.
76. Колосова О.П. Структурно-параметричне моделювання – ефективний напрям конструкторсько-технологічного проектування технічних засобів для одержання реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів / О.П. Колосова, В.В. Ванін, О.Є. Колосов, Г.І. Вірченко // Тез. доп. XVI міжнар. наук.-техн. конф. "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта". – Одеса, 2015. – С. 154 – 158.
77. Ванін В.В. Особливості варіантного геометричного моделювання акустичних концентраторів / В.В.Ванін, О.П.Колосова, Г.І.Вірченко // Тез. доп. XII міжнар. наук.-техн. конф. "ABIA-2015". – Київ, 2015. – С. 26.24 – 26.28.
78. Ванін В.В. До питання варіантного геометричного моделювання акустичних концентраторів / В.В.Ванін, Г.А.Вірченко, Г.І. Вірченко, О.П. Колосова // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – 2014. – №92. – С. 36 – 40.
79. Клубович В.В. Ультразвуковая пайка в радио- и приборостроении / В.В. Клубович, М.Д.Тявловский, В.Л. Ланин. – Мн.: Наука и техника, 1985. – 263 с.
80. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
81. Фокс А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс, М. Пратт. – М.: Мир, 1982. – 304 с.
82. Вірченко В.Г. Комбінаторно-варіаційне моделювання обводів із використанням кривих другого порядку / В.Г. Вірченко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Вип. 91. – К.: КНУБА, 2013. – С. 46-52.
83. Ванін В.В. Комп'ютерне структурно-параметричне геометричне моделювання як основа для комплексної оптимізації процесів проектування та виробництва об'єктів машинобудування [Текст] / В.В. Ванін, Г.А. Вірченко, Г.П. Грязнова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 5/1 (47), 2010. – С. 54-57.

84. Меркулов Л. Г. Теория и расчет составных концентраторов / Л. Г. Меркулов, А. В. Харитонов // Акустический журнал. – 1959. – Т.V. – Вып. 2. – С. 183–190.

85. Вірченко Г.А. Структурно-параметричний підхід як загальна методологія комп'ютерного геометричного моделювання об'єктів машинобудування / Г. А. Вірченко // Прикладна геометрія та інженерна графіка: наук.-техн. зб. – Вип. 83. – К.: КНУБА, 2010. – С. 146-152.

86. Колосова О.П. Прогнозування структурних параметрів полімерних композиційно-волокнистих матеріалів за методологією теорії інтегральної геометрії й геометричних імовірностей / О.П.Колосова // Вісник НТУУ «КПІ», Сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2015. – №1(14). – С. 20–28.

87. Колосова О.П. Використання теорії інтегральної геометрії та геометричних імовірностей для дослідження розподілу відстаней між суміжними колами, що розташовані у вузлах подвійноперіодичної решітки та перетинаються випадковими січними / О.П.Колосова // Тез. доп. IV Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених "Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених". Київ, 2015. — С. 116-121.

88. Кендалл М.Дж. Геометрические вероятности / М.Дж. Кендалл, П. Моран. – М.: Наука, 1972. – 192 с.

89. Сантало Л.А. Интегральная геометрия и геометрические вероятности / Сантало Л.А. – М.: Наука, 1983. – 360 с.

90. Гачяускас Э. Интегрально-геометрический метод нахождения функций распределения длины хорды овала и расстояния внутри овала / Э. Гачяускас // Литовский математический сборник. – 1968. – №2. – С. 237 – 240.

91. Сіренко Г.О. Вплив параметрів розподілу вуглецевих волокон на фізико-механічні властивості композитного матеріалу на основі політетрафторетилену / Г.О. Сіренко, Л.В. Базюк // Фізика і хімія твердого тіла. – 2008. – Т.9. – №4. – С. 909 – 915.

92. Ванин Г.А. Новые функции распределения в механике композиционных сред // Г. А. Ванин // Прикладная механика. — 1984. — Т. 20, № 5. — С. 25—31.

93. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1978. – 832 с.

94. Луговской А.Ф. Расчет ультразвуковых диспергаторов с составными пьезоэлектрическими преобразователями / Луговской А.Ф. / Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Сер. машиностроение. – К.: ВИПОЛ, вып. 33. – 1998. – С. 291– 296.

95. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики / Коршунов Ю.М. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 496 с.

96. Асанов М.О. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы / М.О. Асанов, В.А.Баранский, В.В. Расин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 288 с.

97. http://storage.flyback.org.ru/files/01__ae_ae____249.jpg

98. Колосов О.Є. Методика прогнозування експлуатаційних властивостей затверділих епоксидних полімерів, одержаних на основі епоксидних композицій з використанням ультразвуку, та особливості її патентування / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, О.С. Сахаров, О.П. Колосова, Д.Е. Сідоров // Збірник наукових праць Луцького НТУ «Наукові нотатки». – 2011. – №32. – С. 174–184.

99. Колосова О.П. Прогнозування технологічних параметрів процесу озвучування рідких полімерних зв'язуючих на базі експериментально-статистичного моделювання / О.П. Колосова // Тез. доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми механіки та фізико-хімії конденсованого стану речовини». – Миколаїв, 2015. – С. 210–212.

100. Колосова О.П. Геометричне та математичне моделювання процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими / О.П. Колосова // Збірник наукових праць Луцького НТУ «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». – 2015. – №20. – С. 40–46.

101. Колосова О.П. Підходи до геометричного та математичного моделювання параметрів процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими / О.П. Колосова // Збірник доп. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та науковців каф. ХПСМ інж.-хім. факультету НТУУ «КПІ» «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». Київ, 2015. — С. 52–54.

102. Колосова О.П. Геометричне та математичне моделювання процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими / О.П. Колосова // Тез. доп. Всеукр. наук.-практ. конф. «Сучасні технології промислового комплексу» (СТПК-2015). – Херсон, 2015. – С. 158.

103. Колосов О.Є. Енергоефективні технологічні засади одержання препрегів / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, В.С. Кривошеєв, О.П. Колосова, Д.П. Вікарський // Тез. доп. VIII-ї міжнар. наук.-техн. web-конф. "Композиційні матеріали". – Київ, 2014. – С. 146 – 148.

104. Колосов О.Є. Інноваційний спосіб ультразвукового просочення і дозованого нанесення полімерного зв'язуючого на довгомірний волокнистий матеріал / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, В.С. Кривошеєв, О.П. Колосова, Д.П. Вікарський // Збірник доп. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та науковців каф. ХПСМ інж.-хім. факультету НТУУ «КПІ» «Ресурсоенергоефективні технології і обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів». – Київ, 2014. — С. 17–19.

105. Колосов О.Є. Перспективний спосіб комбінованого просочування волокнистих армуючих матеріалів реактопластичними зв'язуючими гарячого твердіння / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, В.С. Кривошеєв, О.П. Колосова // Збірник доп. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та науковців каф. ХПСМ інж.-хім. факультету НТУУ «КПІ» «Ресурсоенергоефективні технології і обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів». – Київ, 2014. — С. 16–17.

106. Колосов О.Є. Удосконалений пристрій для ультразвукового

просочення і дозованого нанесення полімерного зв'язуючого на довгомірний волокнистий матеріал / О.Є.Колосов, В.І. Сівецький, В.С. Кривошеєв, О.П.Колосова // Збірник доп. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та науковців каф. ХПСМ інж.-хім. факультету НТУУ «КПІ» «Ресурсоенергоєфективні технології і обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів». – Київ, 2014. – С. 20–21.

107. Колосов О.Є. Удосконалений пристрій для комбінованого просочування волокнистих армуючих матеріалів реактопластичними зв'язуючими гарячого твердіння / О.Є.Колосов, В.І. Сівецький, В.С. Кривошеєв, О.П.Колосова // Збірник доп. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та науковців каф. ХПСМ інж.-хім. факультету НТУУ «КПІ» «Ресурсоенергоєфективні технології і обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів». – Київ, 2014. — С. 21–23.

108. Колосов О.Є. Технічний твір «Технічні засоби для одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку (з ілюстраціями)» / О.Є.Колосов, В.І. Сівецький, О.П. Колосова // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №54862 від 20.05.2014; заявка №55207 від 14.03.2014р.

109. Колосов О.Є. Технічний твір «Аналіз технічних засад одержання високоякісних традиційних та наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів (з ілюстраціями)» / О.Є.Колосов, О.П. Колосова // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на службовий твір №61409 від 25.08.2015; заявка №61452 від 11.06.2015р.

110. Пат. на кор. мод. 97158 Україна, МПК В29В15/10. Спосіб ультразвукового просочення і дозованого нанесення полімерного зв'язуючого на довгомірний волокнистий матеріал / Колосов О. Є., Сівецький В. І., Колосова О.П., Кривошеєв В.С. – № u№201405195; заявл. 16.05.2014; опубл. 10.03.2015, Бюл. №5.

111. Пат. на кор. мод. 97509 Україна, МПК В29В15/10. Спосіб комбінованого просочування волокнистих армуючих матеріалів реактопластичними зв'язуючими гарячого твердіння / Колосов О. Є., Сівецький В. І., Колосова О.П., Кривошеєв В.С. – № u№201405192; заявл. 16.05.2014; опубл. 25.03.2015, Бюл. №6.

112. Пат. на кор. мод. 97159 Україна, МПК В29В15/10. Пристрій для ультразвукового просочення і дозованого нанесення полімерного зв'язуючого на довгомірний волокнистий матеріал / Колосов О. Є., Сівецький В. І., Колосова О.П., Кривошеєв В.С. – № u№201405197; заявл. 16.05.2014; опубл. 10.03.2015, Бюл. №5.

113. Пат. на кор. мод. 97160 Україна, МПК В29В15/10. Пристрій для комбінованого просочування волокнистих армуючих матеріалів реактопластичними зв'язуючими гарячого твердіння / Колосов О. Є., Сівецький В. І., Колосова О.П., Кривошеєв В.С. – № u№201405199; заявл. 16.05.2014; опубл. 10.03.2015, Бюл. №5.

114. Kenneth S. Suslick. Applications of ultrasound to materials chemistry / Kenneth S. Suslick // Annual Review of Materials Science. – University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois. – 1999. – Vol. 29. – P.P. 295–326.

115. Liu L. Effect of ultrasound on wettability between aramid fibers and epoxy

resin / Liu L, Huang, Y. D. Zhang, Z. Q. Yang, X. B. // Journal of Applied Polymer Science. – 2006. – Vol. 99. – № 6. – P.P. 3172–3177.

116. Mouritz A. P. Ultrasonic and interlaminar properties of highly porous composites / A.P. Mouritz // Journal of Composite Materials. – 2000. – № 3 (34). – P.P. 218-239.

117. Пат. 6607626 США. МПК B32B5/12; D04H/00. Process and equipment for manufacture of advanced composite structures / Taggart David (US). — № US2002059976; заявл. 30.06.2001; опубл. 23.05.2002.

118. Пат 6939423 США. МПК B32B5/12; D04H/00. Process and equipment for manufacture of advanced composite structures / Taggart David (US). — № US20030443964, 20030523; заявл. 23.05.2003; опубл. 27.11.2003.

119. Пат 7235149 США. МПК B32B5/12; D04H/00. Process and equipment for manufacture of advanced composite structures / Taggart David (US). — № US2005236093; заявл. 26.04.2005; опубл. 27.10.2005.

120. Патент WO 2008001705. МПК C08J5/24; C08L53/02; C08L63/02; C08J5/24; C08L53/00; C08L63/00. Epoxy resin composition, prepreg, and fiber-reinforced composite material / Sakata Hiroaki [JP]; Tomioka Nobuyuki [JP]; Honda Shiro [JP]). — №PCT/JP2007/062665; заявл. 25.06.2007; опубл. 03.01.2008.

121. Патент WO 2008090614. МПК H05K1/03; B32B15/08; C08J5/24. Prepreg, printed wiring board, multilayer circuit board and process for manufacturing printed wiring board / Fukuhara Yasuo [JP]; Watanabe Tomoaki [JP]. — №WO2007JP51166 20070125; заявл. 25.01.2007; опубл. – 31.07.2008.

122. Патент WO 2008087890. МПК C08G59/62; B32B15/08; B32B15/092; H05K3/46; C08G59/00; B32B15/08; H05K3/46. Thermosetting resin composition / Taiyo Ink Mfg Co Ltd [JP]; Murata Katsuto, Nakai Koshin, Hayashi Makoto [JP]. — № WO2008JP50218 20080110; заявл. 15.01.2007; опубл. 24.07.2008.

123. Дослідження ультразвукової кавітаційної технології для підвищення експлуатаційних характеристик епоксидно-поліефірних покриттів: звіт про НДР №2370 (закл.) І.2 15.17.06 / НТУУ КПІ МОН України; керівн. І. М. Федоткін; викон.: І. М. Федоткін, В. І. Сівецький, О. Є. Колосов, О.П.Колосова та ін. – К., 2002. – 102 с. – Держреєстр. в УкрІНТЕІ № 0100U000897.

124. Наукові основи створення фітингів, що термоосаджуються, із реактопластів з використанням ультразвукової кавітаційної технології: звіт про НДР №2492 (закл.) І.2 15.17.06 / НТУУ КПІ МОН України; керівн. І. М. Федоткін; викон.: І. М. Федоткін; В. І. Сівецький, О. Є. Колосов, О.П.Колосова та ін. – К., 2003. – 132 с. – Держреєстр. в УкрІНТЕІ № 0101U000401.

125. Розробка прогресивних технологій відновлення поліетиленових трубопроводів з використанням клейових сумішевих полімерних композиційних матеріалів: звіт про НДР №2498 (закл.) І.2 15.17.06 / НТУУ КПІ МОН України; керівн. В. І. Сівецький; викон.: В. І. Сівецький, О. Є. Колосов, О. П. Колосова, В. М. Кривошеєв та ін. – К., 2003. – 152 с. – Держреєстр. в УкрІНТЕІ № 0101U000402.

126. Створення технологічних засад одержання високоміцних виробів з конструкційних композиційних матеріалів для спеціального машинобудування: звіт про НДР №2714-п (закл.) І.2 15.17.08 / НТУУ КПІ МОН України; керівн. В. І.

Сівецький; викон.: В. І. Сівецький, О. Є. Колосов, О. П. Колосова ін. – К., 2015. – 338 с. – Держреєстр. в УкрІНТЕІ № 0114U001524.

127. Колосов О.Є. Фізична модель структури капілярно-пористого середовища на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, Л.А. Кричківська, О.П. Колосова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 1. – № 5 (61). – С. 6–9.

128. Колосов О.Є. Кінетика процесу просочування волокнистих наповнювачів композиціями епоксидних полімерів / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, Л.А. Кричківська, О.П. Колосова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 2. – №5(62). – С. 13–16.

129. Колосов О.Є. Математичне моделювання базових процесів виготовлення полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвукової модифікації / О.Є.Колосов, В.І.Сівецький, Є.М.Панов, І.О. Мікульонюк та ін. – К.: ВД «Едельвейс», 2012. – 268 с.

130. Статюха Г.О. Розробка комп'ютерної системи підготовки та обробки даних у межах застосування експериментально-статистичної методології для хіміко-технологічних систем / Г.О Статюха, А.Г. Петрань. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2000. – №1. – С. 100–106.

131. Колосов О.Є. Формування полімерних композиційних матеріалів із застосуванням фізико-хімічної модифікації (у двох частинах). Частина 1. Дослідження передумов направленої здійснення фізико-хімічної модифікації / Колосов О.Є. – К: НТУУ КПІ. – 2005. – 251 с.

132. Колосов О.Є. Формування полімерних композиційних матеріалів із застосуванням фізико-хімічної модифікації (у двох частинах). Частина 2. Ефективні режими та обладнання для здійснення фізико-хімічної модифікації / О.Є.Колосов, В.І.Сівецький. – К: НТУУ КПІ, 2006. – 196 с.

133. Колосов О. Є. Технологія одержання багатокомпонентних епоксиполімерів із застосуванням направленої фізико-хімічної модифікації / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, Є. М.Панов – К: НТУУ КПІ, 2010. – 220 с.

134. Малкин А.Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения / А.Я.Малкин, А.Е.Чалых. – М.: Химия, 1979. – 304 с.

135. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер; [пер. с англ. Корнейчука Л. Г. / под ред. Григолюка Э. И.]. — М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.

136. Колосова О.П. Перспективи застосування геометричного моделювання технічних засобів для одержання реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів / О.П.Колосова // Вісник НТУУ «КПІ», Сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2016. – №1(15). – С. 20 – 28.

137. Кудряченко В.В. Розроблення ефективних режимів та обладнання для просочення тканин наповнювачів полімерними зв'язуючими: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології» / Віктор Володимирович Кудряченко. – К., 2002. – 24 с.

138. Колосов О.Є. Обґрунтування процесів та обладнання для одержання виробів з композицій епоксиполімерів ультразвуковою модифікацією: автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної

технології» / Олександр Євгенович Колосов. – К., 2010. – 36 с.

139. Колосов А.Е. Моделирование технологических процессов и оборудования для формования изделий из полимерных композиционных материалов / А.Е. Колосов, В.И. Сивецкий, Е.П. Колосова, В.С. Кривошеев и др. // Свидетельство о депонировании произведения в БД РАО «Копирус» (г. Москва) №014-003247 от 10.04.2014г. – 38 стр. – ISBN 978-5-4472-3199-6.

140. Колосов О.Є. Використання методів математичного та експериментально-статистичного моделювання для оптимізації технологічних параметрів ультразвукового одержання полімерних композиційних матеріалів / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, В.С. Кривошеев, О.П. Колосова // Математичне та комп'ютерне моделювання. – 2014. – Вип.11. – С. 61 – 71.

141. Колосова О.П. Моделювання процесів виготовлення реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів [монографія] / О.П. Колосова, В. В. Ванін, Г.А Вірченко, О.Є. Колосов. – К.: ВПК «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2016. – 164 с.

142. Колосова О.П. Актуальність моделювання технологічних процесів одержання реактопластичних композитів / О.П. Колосова // Тез. доп. Всеукр. наук.-практ. конф. «Сучасні технології промислового комплексу» (СТПК-2016). – Херсон, 2016. — С. 145.

143. Колосова О.П. Деякі результати моделювання технологічних процесів одержання реактопластичних композитів / О.П. Колосова // Тез. доп. Всеукр. наук.-практ. конф. «Сучасні технології промислового комплексу» (СТПК-2016). – Херсон, 2016. — С. 146.

144. Колосова О.П. Геометричне моделювання процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів полімерами / О.П. Колосова // Тез. доп. Всеукр. наук.-практ. конф. «Прикладна геометрія та інформаційні технології в моделюванні об'єктів, явищ і процесів» (AGIT-2016). – Миколаїв, 2016. — С. 71 – 72.

145. Колосова О.П. Основні результати геометричного моделювання процесів та обладнання для одержання реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів / О.П. Колосова // Тез. доп. Всеукр. наук.-практ. конф. «Прикладна геометрія та інформаційні технології в моделюванні об'єктів, явищ і процесів» (AGIT-2016). – Миколаїв, 2016. — С. 73 – 74.

146. Колосова О.П. Доцільність застосування методології структурно-параметричного геометричного моделювання для оптимізації технологічних процесів та обладнання / О.П. Колосова // Тез. доп. IV Всеукр. наук.-практ. конф. «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». – Київ, 2016. — С. 36 – 37.

147. Колосова О.П. Аспекти моделювання процесів та обладнання для одержання високоміцних й бездефектних реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів / О.П. Колосова // Тез. доп. IV Всеукр. наук.-практ. конф. «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». – Київ, 2016. — С. 38 – 40.

148. Колосова О.П. Результати моделювання процесів та обладнання для одержання високоміцних й бездефектних реактопластичних композиційно-

волокнистих матеріалів / О.П. Колосова // Тез. доп. IV Всеукр. наук.-практ. конф. «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». – Київ, 2016. — С. 40 – 41.

149. Колосова О.П. Геометричне моделювання процесів та обладнання для одержання реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.01.01 «прикладна геометрія, інженерна графіка» / Олена Петрівна Колосова. – К.: КНУБА, 2016. – 26 с.

150. Колосова О.П. Технічний твір «Геометричне моделювання процесів та обладнання для одержання реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів (з ілюстраціями)» / О.П. Колосова // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №70102 від 27.01.2017; заявка №70645 від 29.11.2016р.

151. Проектування технологічних процесів та устаткування для одержання традиційних і наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів: звіт про НДР №2836-п (закл.) І.2 15.17.08 / НТУУ КПІ МОН України; керівн. О.Є. Колосов; викон.: О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. П. Колосова ін. – К., 2016. – 100 с. – Держреєстр. в УкрІНТЕІ № 0115U000179.

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОЗВУЧУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ РІДКИХ ЕПОКСИДНИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ

У додатку А досліджуються питання оптимізації технологічних параметрів процесу озвучування УЗ-концентраторами рідких ЕЗ, зокрема, ЕС, що входить до умовного блоку І (див. рис. 2.1) одержання реактопластичних КВМ, з використанням методів як експериментально-статистичного, так і математичного моделювання [98].

При цьому озвучування здійснюється УЗ-концентраторами конічної форми, оптимальні геометричні параметри яких були досліджені у розділі 3 даної роботи.

А.1. Експериментально-статистична обробка результатів вимірювань і методика оптимізації технологічних параметрів озвучування рідких епоксидних зв'язуючих

Обробку результатів експериментальних вимірювань та оптимізацію технологічних параметрів процесу озвучування (УЗ-обробку) ЕС, що входила до складу ЕЗ, при формуванні реактопластичних КВМ здійснювали наступним чином.

По результатам експериментальних досліджень визначали середнє значення \bar{x} дискретної випадкової вимірюваної величини x за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{N^o} \sum_{i=1}^N x_i,$$

де N^o – число випробувань;

x_i – значення випадкової вимірюваної величини при i -му випробуванні.

Середньоквадратичне відхилення $\bar{S}_\sigma(x)$ дискретної випадкової величини x характеризує розсіювання експериментальних даних і визначається за формулою:

$$\bar{S}_\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - N\bar{x}^2}{N^o - 1}}.$$

Коефіцієнт варіації k_v визначають за величиною середньоквадратичного відхилення по формулі:

$$k_v = \frac{\bar{S}_\sigma(x)}{\bar{x}} \cdot 100, [\%].$$

Точність середнього арифметичного $\tilde{\varepsilon}$ визначають так:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\bar{x}}{\frac{\sqrt{N_o}}{\tilde{f}}},$$

де \tilde{f} – критерій точності, що залежить від числа вимірів N^o і вибраної ймовірності знаходження розрахованих величин середньоарифметичного всередині довірчого інтервалу ($\bar{x} - \tilde{\varepsilon}$, $\bar{x} + \tilde{\varepsilon}$).

Що стосується вибору математичних методів планування експерименту, які застосовували для оптимізації технологічних параметрів процесу озвучування рідких ЕК, то слід відзначити наступне.

При детальному вивченні локальної області факторного простору (тобто простору, який утворюють вже раніше досліджувані вхідні технологічні параметри), до цього вже приблизно вивченої, слід обирати саме *D*-оптимальний план реалізації експерименту.

Останній, як правило, і застосовується для вирішення задач такого типу, так як дозволяє отримувати план реалізації експерименту з меншою кількістю точок, на відміну від повнофакторного експерименту. Це, у свою чергу, що значно зменшує сировинні, часові й енергетичні витрати на реалізацію *D*-оптимального плану.

Тому, скориставшись цим, можна синтезувати *D*-оптимальний план з мінімально можливою для більш-менш достовірної інформації кількістю експериментів, величина яких, звичайно, є більшою за кількість факторів, і в результаті регресивного аналізу знайти коефіцієнти шуканої математичної моделі.

Синтез *D*-оптимального плану та статистичну обробку отриманих експериментальних даних проводили за допомогою програмного продукту STAT-SENS [130]. Відповідно до використовуваної методики обробки експериментальних даних [130], проводили також перевірку однорідності дисперсій та оцінку значимості коефіцієнтів для математичних моделей, одержаних для досліджуваних процесів модифікації КВМ.

Для перевірки гіпотези про адекватність математичної (експериментально-статистичної) моделі необхідно співставити досягнуту точність моделі з величиною, яка характеризує точність спостережень. Якщо похибки, що характеризують точність моделі, перевищують похибки спостережень, то гіпотеза про адекватність моделі відхиляється, і навпаки.

Так як перевірка адекватності отриманих моделей досліджуваних процесів фізичної (УЗ) модифікації проводилась за допомогою статистичного критерію Фішера F , то вважали, що рівняння регресії адекватно описує досліджуваний процес виготовлення КВМ, якщо остаточно дисперсія (дисперсія адекватності) $s_{ост}^2$ вихідної величини $Y_i^p(X) = Y_{розр}$, розрахованої по рівнянню регресії відносно експериментальних даних Y_i , не перебільшує в статистичному сенсі похибку експериментальних досліджень [130].

Слід зазначити, що для визначення шуканої похибки експериментальних досліджень необхідно мати декілька значень вихідної змінної $Y_{розр}$, виміряної

при однакових умовах, у зв'язку із чим необхідно проводити паралельні експерименти. При цьому вважають, що отримане рівняння регресії адекватно описує досліджуваний процес, якщо виконується наступна нерівність:

$$F_p = s_{ост}^2 / s_o^2 < F_T,$$

де s_o^2 – дисперсія відносно середнього \bar{Y} ;

$s_{ост}^2$ – остаточна дисперсія;

F_T і F_p – відповідно теоретичне (табличне) і розраховане значення критерію Фішера.

Дисперсія відносно середнього s_o^2 дорівнює:

$$s_o^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{N_{II} - I},$$

де N_{II} – число паралельних вимірювань показника.

Остаточна дисперсія $s_{ост}^2$ дорівнює:

$$s_{ост}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (Y_{розн} - Y_i)^2}{m_e - n_k},$$

де різниця $m_e - n_e = \varphi_I$ – число ступенів свободи, що є різницею між числом експериментальних точок (m_e) і числом коефіцієнтів у рівнянні, включаючи вільний член (n_k).

Але якщо паралельні експерименти не проводили (у зв'язку з необхідністю витрачання великого обсягу енергетичних та сировинних ресурсів), то розрахувати дисперсію (похибку) експериментів у цьому випадку неможливо. Тоді замість перевірки адекватності складеного рівняння регресії виконували оцінку якості апроксимації дослідних (експериментальних) точок прийнятим рівнянням регресії.

Таку перевірку здійснювали порівнянням остаточної дисперсії $s_{ост}^2$ та дисперсії s_o^2 відносно середнього \bar{y} по всім дослідом. При цьому вимога, за якої рівняння регресії має сенс, виражається нерівністю $F_p > F_T$.

Що стосується іншого аспекту оптимізації технологічних параметрів фізичної та хімічної модифікації КВМ, то відомо [5], одним із найвдаліших методів розв'язання задачі оптимізації технологічних процесів з будь-якою кількістю відгуків (Y_i) є використання узагальненого критерію оптимізації Харінгтона і так званої функції бажаності D , на базі яких і побудований математичний апарат STAT-SENS [130].

При її побудові вимірювані значення відгуків перетворюють у безрозмірну шкалу бажаності d з інтервалами її зміни від 0 до 1. При цьому значення $d(D) = 0$ відповідає абсолютно неприпустимому значенню відгуку, а $d(D)=1$ – найбажанішому значенню відгуку. Тому при знаходженні оптимальних значень проводили багатокритеріальну оптимізацію із залученням функції бажаності Харінгтона.

Крім того, при здійсненні пошуку компромісної точки, тобто точки, яка б задовольняла значення всіх технологічних чи експлуатаційних характеристик KBM, значення змінних розігрували згідно з нормальним законом розподілу. При цьому найкращі та найгірші значення вихідної змінної Y були вибрані відповідно до апіорної інформації про особливості технологічного процесу формування KBM та про бажані результати експерименту, які можна отримати за даних умов.

Крім того, для досліджуваних математичних моделей визначали такі статистичні характеристики, як SSE , SSR , $r_{x,y}$ та R^2 , де:

SSE – сума квадратів помилок, що дорівнює:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

де y_i – експериментальні дані;

\hat{y}_i – розраховані за допомогою апроксимуючого поліному значення вихідної величини;

SSR – сума квадратів, що пояснює регресію, і яка обчислюється як квадрат різниці між середнім значенням вихідної змінної \bar{y} та розрахованим значенням \hat{y}_i :

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2;$$

$r_{x,y}$ – коефіцієнт кореляції, що дорівнює:

$$r_{x,y} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{var}(x) \cdot \text{var}(y)}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

при цьому чисельник виразу для $r_{x,y}$ обчислюється так:

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(x_i - \bar{x} \right) \left(y_i - \bar{y} \right),$$

де x_i, y_i – експериментальні значення відповідно незалежної та залежної змінної; \bar{x}, \bar{y} – середнє експериментальне значення відповідно незалежної та залежної змінної;

множники знаменника виразу для $r_{x,y}$ обчислюються так:

$$\text{var}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 ; \quad \text{var}(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 ,$$

а R^2 – коефіцієнт детермінації, що є квадратом коефіцієнта кореляції $r_{x,y}$.

А.2. Результати оптимізації технологічних характеристик епоксидних олігомерів і зв'язуючих на їх основі, що були піддані ультразвуковій обробці

У таблиці А.1 наведені зведені порівняльні результати вимірювань деяких технологічних характеристик вихідних ЕС та експлуатаційних характеристик затверділих ЕК на основі ЕД-20+ДЕТА, а також композицій, отриманих за відомим способом аналога [131], способом прототипу [132] і за досліджуваними технологічними режимами [133].

Таблиця А.1. Вплив параметрів УЗ-обробки на технологічні і експлуатаційні властивості ЕК у складі ЕД-20 + ДЕТА

Параметри УЗ-обробки					Властивості ЕС			
f , кГц	A , мкм	I , Вт/см ²	T , °C	τ , хв	η , Па·с	Θ_{min} , °	h_{max} , мм	T_c , °C
Вихідна ЕС марки ЕД-20								
–	–	–	–	–	0,78	30	0,90	104
Віброакустична обробка ЕС марки ЕД-20								
29	8	3	100	40	0,86	21	1,40	114
Віброакустична обробка ЕС марки ЕД-20								
17-24	50-120	15-30	70-90	30-45	0,840	19-20	2,00	118
УЗ-обробка ЕС марки ЕД-20 за розробленою технологією								
16	10	4	50	25	0,83	18,6	2,40	118,5
16	30	10	80	35	0,83	18,8	2,50	119,0
18	10	4	50	25	0,83	18,5	2,40	118,5
18	30	10	80	35	0,83	18,9	2,48	118,5
20	20	7	65	30	0,83	18,4	2,35	120,0
20	30	10	80	35	0,82	19,0	2,35	118,5
22	10	4	50	25	0,83	18,5	2,25	118,8
22	30	10	70	35	0,83	18,8	2,10	118,0
24	20	7	60	30	0,83	18,5	2,10	119,0
24	30	10	80	35	0,83	19,0	2,15	118,0

При цьому для отримання достовірної картини щодо ефектів зміцнення та поліпшення експлуатаційних властивостей відтворювали експерименти за схемою усіх способів на ЕС марки ЕД-20, взятої з однієї партії. Параметри відтворення експериментів указані у верхній частині табл. А.1.

З таблиці А.1 видно, що відхилення від описаних ефективних режимних параметрів УЗ-обробки ЕС марки ЕД-20 призводить до погіршення технологічних і експлуатаційних характеристик ЕК.

Було експериментально встановлено, що часова залежність крайового кута змочування Θ і змочувальної здатності $\sigma \cos \Theta$ для низьких УЗ-частот f , що досліджуються, і температур розігрівання (обробки) T носить також екстремальний характер (див. рис. А.1).

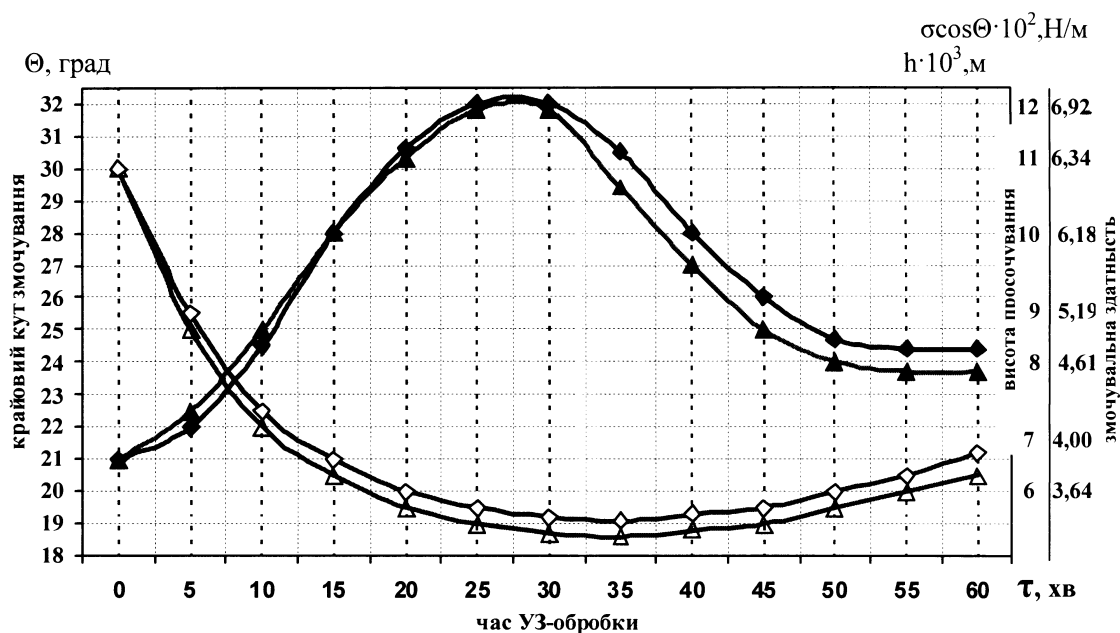


Рис. А.1. Зміна крайового кута змочування Θ по скляній підкладці і змочувальної здатності $\sigma \cos \theta$ ЕС марки ЕД-20 при температурі $T = 20^\circ \text{C}$ у залежності від часу озвучування τ у низькочастотному УЗ-діапазоні:

частота $f = 17$ кГц для Θ (Δ) і для $\sigma \cos \theta$ (\blacktriangle);

частота $f = 22$ кГц для Θ (\diamond) і для $\sigma \cos \theta$ (\blacklozenge);

h – висота підйому ЕС марки ЕД-20 по скляному капіляру [98]

При зменшенні амплітуди коливань A (а отже, й інтенсивності I) крайовий кут змочування ЕС по скловолокну Θ дещо меншає, а величина змочувальної здатності $\sigma \cos \Theta$ збільшується.

Особливістю досліджених ефективних режимів УЗ-модифікації є й те, що після змішування компонентів композиції на основі ЕС (тобто без твердника) для покращення її гомогенізації суміш ЕК обробляють при тих же значеннях частоти, амплітуди, інтенсивності коливань і відношенні площі випромінювача поздовжніх УЗК до маси наважки епоксидної основи, але при температурі $20\text{--}25^\circ \text{C}$ і протягом декількох секунд (10 – 15 с), щоб не допустити початку процесу полімерізації.

Експериментально було встановлено, що якщо обробляти УЗ суміш ЕС марки ЕД-20 (як озвученої, так і неозвученої) і твердника ДЕТА при температурі, що перевищує 25 °С, а також впродовж часу, що перевищує 15 с, відбувається поступове неконтрольоване твердіння суміші із різким погіршенням кінцевих властивостей полімеру. Зазначимо, що наведені параметри УЗ-обробки сприяють швидкому перемішуванню, а також рівномірному розподілу одного компонента суміші в іншому.

Для визначення впливу параметрів УЗ-обробки на технологічні властивості ЕС марки ЕД-20 і експлуатаційні властивості затверділих ЕК на його основі були проведені експериментальні дослідження згідно з синтезованим *D*-оптимальним планом експерименту для кожної залежної змінної [130].

У таблиці А.2 показано *D*-оптимальний план та результати експериментів у реальних координатах.

Таблиця А.2. D-оптимальний план та дані експериментальних досліджень, отриманих в результаті реалізації УЗ-модифікації ЕС та ЕК на їх основі, в реальних координатах

f , кГц	A , мкм	I , Вт/см ²	T , °С	τ , хв.	η , Па·с	Θ_{min} , °	h_{max} , мм	T_c , °С
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
16	10	4	50	25	0,835	18,6	2,40	118,5
16	30	10	80	35	0,832	18,8	2,50	119,0
18	10	4	50	25	0,83	18,5	2,40	118,5
18	30	10	80	35	0,832	18,9	2,48	118,5
20	20	7	65	30	0,83	18,4	2,35	120,0
20	30	10	80	35	0,828	19	2,35	118,5
22	10	4	50	25	0,832	18,5	2,25	118,8
22	30	10	70	35	0,833	18,8	2,10	118,0
24	20	7	60	30	0,834	18,5	2,10	119,0
24	30	10	80	35	0,831	19	2,15	118,0

У табл. А.3 представлено експериментальні і розраховані значення змінних після здійснення УЗ-модифікації ЕС та ЕК на їх основі.

Значення вихідних функцій (відгуків) при здійсненні пошуку компромісної точки після здійснення УЗ-модифікації ЕС та ЕК на їх основі становлять:

Відгук	Найкраще значення	Найгірше значення
Y_1	0,84	0,82
Y_2	19	18
Y_3	2,7	2
Y_4	122	177.

Таблиця А.3. Зведені експериментальні і розраховані значення змінних після здійснення УЗ-модифікації ЕС та ЕК на їх основі

Експериментальні значення				Розраховані значення			
η , Па·с	Θ_{min} , °	h_{max} , мм	T_c , °C	η , Па·с	Θ_{min} , °	h_{max} , мм	T_c , °C
X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4
0,835	18,6	2,40	118,5	0,832	18,47	2,45	118,5
0,832	18,8	2,50	119,0	0,831	18,89	2,50	119
0,83	18,5	2,40	118,5	0,832	18,47	2,38	118,5
0,832	18,9	2,48	118,5	0,830	18,89	2,43	118,5
0,83	18,4	2,35	120,0	0,831	18,67	2,32	120
0,828	19	2,35	118,5	0,830	18,88	2,35	118,5
0,832	18,5	2,25	118,8	0,831	18,46	2,22	118,8
0,833	18,8	2,10	118,0	0,833	18,74	2,10	118
0,834	18,5	2,10	119,0	0,832	18,60	2,08	119
0,831	19	2,15	118,0	0,829	18,88	2,19	118
Розрахований критерій Фішера F_T				10,025	8,0214	5,889	9,8501
Адекватність (так/ні)				Так	Так	Так	Так

Слід зауважити, що значення параметрів оптимізації в точці оптимуму не завжди входить в той круг, що був окреслений на початку оптимізації. Це пояснюється тим, що при розрахунках ми маємо справу з функцією, що описує експериментальні дані не абсолютно точно, а з деякою похибкою.

Точка оптимуму, отримана для функції бажаності $d(D) = 0,99997$ при кількості обчислень її значень, що становить 21120, досягається за таких значень вхідних факторів:

$X_1 = 16$ (кГц); $X_2 = 10$ (мкм); $X_3 = 4$ (Вт/см²); $X_4 = 80$ (°C); $X_5 = 35$ (хв).

Значення вихідних функцій технологічних (Y_1 – Y_3) показників ЕС і ЕК та експлуатаційних (Y_4) показників ЕП на їх основі у знайдений точці оптимуму становить: $Y_1 = 0,8427$ (Па·с); $Y_2 = 19,25$ (°); $Y_3 = 3,024$ (мм); $Y_4 = 121,24$ (°C).

Таким чином, фізична (ультразвукова) модифікація епоксидно-амінної композиції у складі ЕД-20 + ДЕТА за рахунок застосування ефективних режимів УЗ-обробки дозволяє вирішити технічну задачу одержання модифікованої ЕК, що використовується як для просочування тканих волокнистих композитів, так і для формування КВМ на їх основі, що володіє високими технологічними й експлуатаційними характеристиками.

Отримані математичні залежності дозволяють, у свою чергу, прогнозувати технологічні параметри процесу озвучування при приготуванні просочувальних композицій, тобто оптимізувати відповідні технологічні режими формування КВМ [132, 136].

ПРОГНОСТИЧНЕ КІНЕТИЧНЕ РІВНЯННЯ ПРОЦЕСУ «ВІЛЬНОГО» ПРОСОЧУВАННЯ ОРІЄНТОВАНИХ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ РІДКИМИ ЕПОКСИДНИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ

У додатку Б наводиться уточнене прогностичне кінетичне рівняння процесу «вільного» просочування ОВН рідкими ЕЗ [128].

Отримане кінетичне рівняння включає у себе структурні характеристики просочуваного ОВН, а саме пористість, еквівалентний (ефективний) капілярний радіус та питому внутрішню поверхню, що за розробленим адаптованим підходом знаходяться в результаті застосування методології теорії інтегральної геометрії й геометричних імовірностей [86] при аналізі модельної і реальної структур ОВН, просочених рідкими ЕЗ [127].

Б.1. Типові схеми процесу «вільного» просочування

Традиційно процес просочування ОВН розчинами ЕЗ проводять по наступній схемі (див. рис. Б.1).

ОВН (стрічка, ровінг або джгут) 1 змотується з бобіни, і проходячи через систему роликів 2 у просочувальній ванні 3 з рідким ЕЗ, просочується ним.

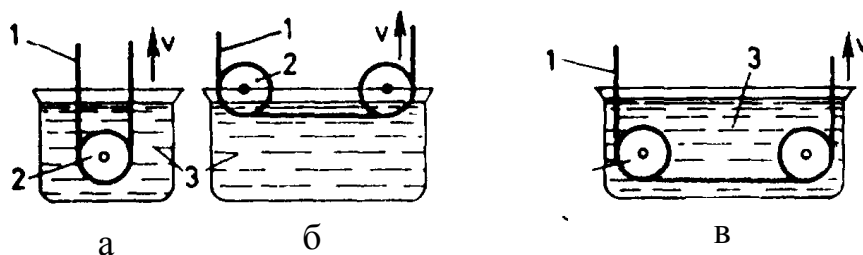


Рис. Б.1. Схеми просочування ОВН:

а – поздовжнє просочування;

б – поперечне просочування;

в – загальний випадок (поздовжнього + поперечного) просочування;

1 – просочуваний ОВН;

2 – ролик;

3 – просочувальна ванна з рідким ЕЗ (ЕК)

Надалі контролюється (поза ванною 2) вміст ЕЗ у структурі просоченого ОВН, наприклад, за рахунок застосування пари випромінюючих УЗ пластин, тобто відбувається видалення надлишку ЕЗ.

Час просочування t при вертикальному введенні ОВН, що просочується у ванні (див. рис. Б.1, *а*), дорівнює $t = t_1$, де t_1 – час поздовжнього просочування.

При поперечному (радіальному) просочуванні (див. рис. Б.1, *б*) $t = t_2$, де

t_2 – час радіального просочування.

У загальному випадку (див. рис. Б.1, в) кумулятивний час $t = t_1 + t_2$. Тому уявляється доцільним розглянути загальний варіант "вільного" просочування (у стаціонарній постановці), тобто за припущення, що швидкість руху наповнювача скрізь просочувальну ванну визначається суто швидкістю (кінетикою) просочування ОВН [1, 128].

Тривалість перебування ОВН у просочувальному розчині визначається швидкістю руху полотна й розмірами просочувальної ванни. Однак відсутність експериментальних даних не дає можливості встановити пряму залежність між якістю просочування і тривалістю перебування ВН у розчині ЕЗ.

Б.2. Уточнене прогностичне кінетичне рівняння процесу «вільного» просочування

Уточнені кінетичні рівняння поздовжнього або поперечного «вільного» просочування безперервного ОВН як капілярно-пористого тіла ЕЗ отримані для найбільш раціональної з технологічної точки зору форми поперечного перетину ОВН (стрічкові матеріали: склотканини, скломати, джгути прямокутного поперечного перетину) з урахуванням його структурно-геометричних параметрів і параметрів процесу просочування, а саме: зусилля натягнення ВН, реологічних властивостей рідкого ЕЗ і тиску при просочуванні.

Отримання кінетичних рівнянь, що описують у загальному випадку рух ЕЗ в системі випадкових пор пористого середовища, здійснено з використанням класичної теорії фільтрації для ламінарної (внаслідок високої в'язкості) течії в'язкої рідини (ПЗ), що не стискується.

У результаті усереднення таких рівнянь по елементарному фізичному об'єму середовища будемо мати відомий закон Дарсі [1, 129], з якого випливає, що швидкість процесу просочування є постійною вздовж нормалі до границі поверхні пористого тіла, що просочується.

Розглянемо процес просочування на прикладі скловолокнистих наповнювачів тканого типу на базі відповідної геометричної (фізичної) моделі структури ОВН. У випадку, якщо пори наповнювача, які з'єднані між собою, розташовані регулярно (ткані структури), і довжини та діаметри їх співрозмірні, характеристикою процесу «вільного» просочування може слугувати загальна висота рівня просочувальної рідини, що підіймається під дією капілярних сил.

При просочуванні однонаправленої волокнистої арматури має місце виражена анізотропія швидкості капілярної проникності розчину: максимальна швидкість спостерігається вздовж капілярних каналів волокнистої структури, а мінімальна – в радіальному напрямі [1, 128 – 129].

Якщо вибрати як характеристику поперечного просочування для тканого наповнювача (або поздовжнього просочування для джгута) загальну висоту рівня просочувальної рідини, то швидкість penetрації (або поздовжнього просочування у випадку джгута) може бути знайдена, наприклад, з рівняння (Б.1) рівноваги сил, що діють в елементарному капілярі:

$$\Delta P = \Delta P_{зовн} + \Delta P_{зидр} + \Delta P_{вязк} = 0, \quad (Б.1)$$

де $\Delta P_{зовн}$ – зовнішні сили, що віднесені до одиниці площі поперечного перетину;

$\Delta P_{зидр}$ – гідростатичний тиск;

$\Delta P_{вязк}$ – сили в'язкого тертя, віднесені до одиниці площі поперечного перетину.

Зовнішні сили дорівнюють:

$$\Delta P_{зовн} = \Delta P_{кап} = \Delta A_{змоч} / \Delta h,$$

де $\Delta A_{змоч}$ – робота сил змочування при підйомі рідини на висоту Δh , віднесена до одиниці площі поперечного перетину капіляра:

$$\Delta A_{змоч} = S_{уд} \Delta h (\sigma_{тж} - \sigma_{тг}) = S_{уд} \Delta h \sigma_{жг} \cos \Theta.$$

Тут $S_{уд}$ – поверхня одиниці об'єму капілярно-пористого тіла;

$\sigma_{тг}$, $\sigma_{тж}$, $\sigma_{жг}$ – поверхневий натяг на кордоні розділу "тверде тіло – газ", "тверде тіло – рідина", "рідина – газ" відповідно;

Θ – крайовий кут змочування.

Тоді

$$\Delta P_{зовн} = S_{уд} \sigma_{жг} \cos \Theta.$$

Другий член рівняння (1) дорівнює:

$$\Delta P_{зидр} = - \Delta A_{зидр} / \Delta h,$$

де $\Delta A_{зидр}$ – робота, необхідна для підняття стовпа рідини висотою h на висоту Δh , віднесена до одиниці площі поперечного перетину:

$$\Delta A_{зидр} = \varepsilon \gamma g h \Delta h,$$

де ε – пористість.

Звідси

$$\Delta P_{зидр} = - \Delta A_{зидр} / \Delta h = - \varepsilon \gamma g h.$$

Третій член рівняння (Б.1) визначається як

$$\Delta P_{вязк} = - \frac{S_{мп}}{r_{еф}} \eta h \frac{dh}{dt},$$

де η – в'язкість рідини;

$r_{еф}$ – ефективний радіус пор;

S_{mp} – поверхня тертя течії рідини в одиниці об'єму тіла.

Для ОВН можна прийняти $S_{mp} \approx S_{y\partial}$. Тоді рівняння (Б.1) можна переписати таким чином:

$$\Delta P = S_{y\partial} \sigma_{жс} \cos \Theta - \varepsilon \gamma g h - \frac{S_{mp}}{r_{ef}} \eta h \frac{dh}{dt} = 0, \quad (Б.2)$$

рішення якого має вигляд:

$$t = \frac{\eta S_{mp} S_{y\partial} \sigma \cos \theta}{\varepsilon^2 \gamma^2 g^2 r_{ef}} \left[\ln \left| \frac{\exp(1)}{1 - \varepsilon \gamma g h / S_{y\partial} \sigma \cos \theta} \right| - \frac{\varepsilon \gamma g h}{S_{y\partial} \sigma \cos \theta} \right]. \quad (Б.3)$$

При $t \rightarrow \infty$ максимальна висота підйому рідини (гранична або максимальна висота поздовжнього просочування) h_∞ дорівнює:

$$h_\infty = \frac{S_{y\partial} \sigma \cos \theta}{\gamma g \varepsilon}.$$

Позначимо

$$a_o = \frac{\rho g \varepsilon r_{ef}}{\eta S_{mp}}; \quad \phi_s = S_{mp} / S_{y\partial},$$

де ϕ_s — безрозмірний коефіцієнт.

Тоді формула (Б.3) прийме вигляд

$$t = \frac{h_\infty}{a_o} \left[-\ln \left(\left| 1 - \frac{h}{h_\infty} \right| \right) - \frac{h}{h_\infty} \right] = \frac{h_\infty}{a_o} \left[\ln \frac{1}{\left| 1 - \frac{h}{h_\infty} \right|} - \frac{h}{h_\infty} \right]. \quad (Б.4)$$

Формула (Б.4) для малих часів (регулярні ткани пористі структури) з урахуванням розкладання логарифмічної функції в ступеневий ряд і відкидання членів ряду більш, ніж третього порядку малості, запишеться таким чином:

$$t = \frac{\eta \phi_s h^2}{2 \sigma \cos \theta r_{ef}} = \frac{\eta S_{mp} h^2}{2 S_{y\partial} \sigma \cos \theta r_{ef}}. \quad (Б.5)$$

Формула (Б.5) при $\phi_s = 1$ ($S_{mp} \approx S_{y\partial}$, що справедливо для однонаправлених структур ОВН – джгутів, ровінгів) має вигляд:

$$t = \frac{\eta h^2}{2 \sigma \cos \theta r_{ef}}. \quad (Б.6)$$

З рівняння (Б.6) слідує, що час t , необхідний для просочування ОВН рідким ЕЗ на висоту h , прямо пропорційний h^2 і обернено пропорційний еквівалентному (ефективному) капілярному радіусу r_{ef} .

Тобто шукана кінетична крива процесу «вільного» поздовжнього просочування описується так: висота поздовжнього просочування h ОВН дорівнює кореню квадратному від часу поздовжнього просочування t з коефіцієнтом пропорційності, що враховує r_{ef} ОВН, змочувальну здатність $\sigma \cos \theta$ і динамічну в'язкість η рідкого ПЗ.

Рівняння (Б.6) дозволяє прогнозувати основні кінетичні параметри процесу «вільного» просочування ОВН (час і швидкість просочування, висоту підйому зв'язуючого), а також конструктивні параметри обладнання для просочування (габарити просочувальної ванни).

Таким чином, з рівняння (Б.6) випливає, що, знаючи реологічні властивості рідкого ЕЗ й побудовану експериментальну кінетичну криву процесу «вільного» просочування, можна розрахунковим шляхом знайти значення r_{ef} .

Причому це значення не повинно залежати від характеру кінетичної кривої, тобто від конкретного вибору т. О (t_o, h_o) на відрізку характерної кінетичної кривої (рис. Б.2).

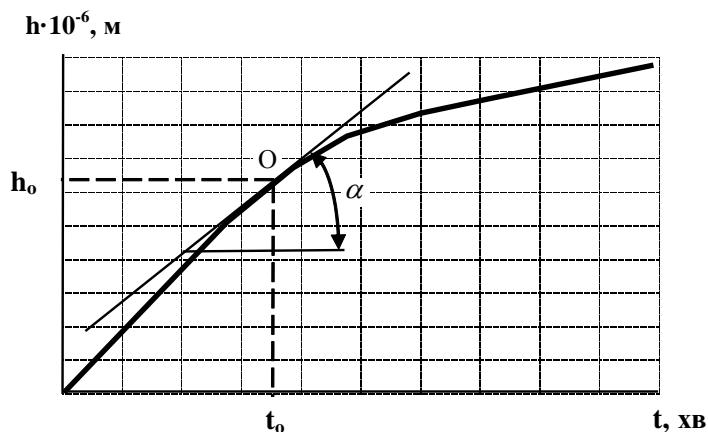


Рис. Б.2. До визначення r_{ef} ВН розрахунковим методом для характерної кінетичної кривої процесу «вільного» просочування

З рівняння (Б.6) можна також знайти значення ефективного радіуса пор r_{ef} :

$$\frac{dh}{dt} = \frac{r \sigma \cos \theta}{4 \eta h} \Rightarrow r_{ef} = \frac{dh}{dt} \frac{4 \eta h}{\sigma \cos \theta} = \operatorname{tg} \alpha \frac{4 \eta h}{\sigma \cos \theta}, \quad (\text{Б.7})$$

де $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс кута нахилу дотичної до експериментальної кінетичної кривої у фіксований момент часу t .

Напрями інтенсифікації процесу просочування, відповідно до (Б.5) і (Б.6), такі: $S_{уд} \uparrow$; $\sigma_{жг} \cos \Theta \uparrow$; $\Theta \downarrow$; $\eta \downarrow$; $\epsilon \downarrow$, тобто підвищення питомої внутрішньої поверхні, змочувальної здатності чи зниження крайового кута змочування, в'язкості або пористості.

Б.3. Знаходження ефективного капілярного радіуса для випадку просочення тканих структур

В технології одержання виробів з КВМ на основі ОВН, наприклад, при виготовленні склотекстолітів, як скловолокнистий наповнювач використовують різні види склотканин сатинового, саржевого і полотняного переплетення (див. рис. Б.3).

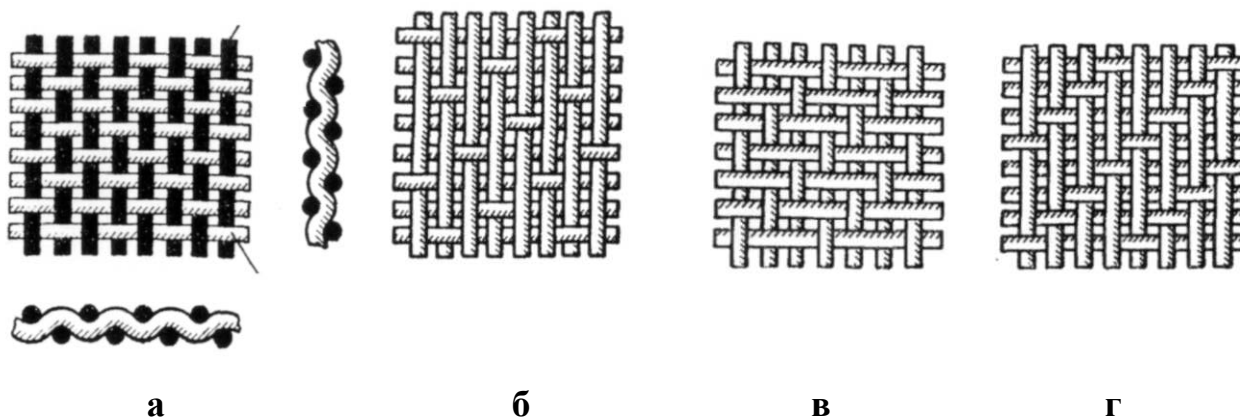


Рис. Б.3. Різні види переплетення тканин:

а — полотняне;

б — сатинове;

в і г — саржеве (тканини типу 1/2 і 3/1)

При цьому використання скловолокнистих наповнювачів (див. рис. Б.4), і, зокрема склотканин, обумовлено перш за все цінними властивостями саме скляного волокна: його високою механічною міцністю і теплостійкістю.

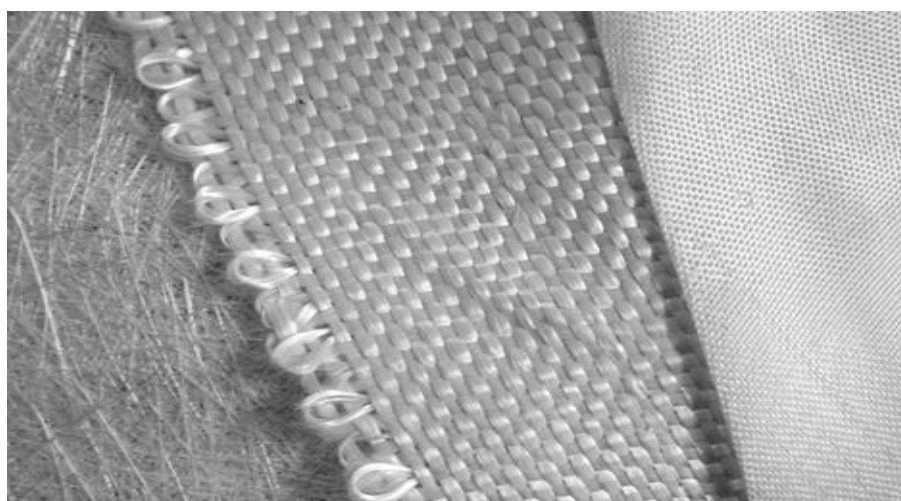


Рис. Б.4. Деякі види армуючих полотен на основі скловолокна:

зліва направо:

скломат; тканина з рівінгу; тканина полотняного переплетіння

Мабуть, структуру переплетення таких тканин можна представити як лінійною моделлю (в разі просочення одного шару тканини, що найчастіше і відбувається), так і регулярною решітчастою моделлю (у разі одночасного просочення декількох розташованих один над одним шарів тканини або скломату).

Спробуймо тепер знайти r_{ef} для тканих (тобто регулярних) структур, що являють собою переважно гексагональне упакування волокон, розрахунковим методом. Для таких структур переважним є т.зв. поперечне (впоперек волокон) просочення.

Теоретично r_{ef} гранично ущільненого армуючого ВН круглого перетину можна розрахувати за формулою [28 – 30]:

$$r_{ef} = \frac{2S}{P}, \quad (Б.8)$$

де S – площа перетину капіляра;

P – периметр перетину капіляра.

В ідеальному випадку безпосереднього контакту циліндричних волокон одного діаметру (скляних волокон у нашому випадку) найбільш ймовірною є гексагональна структура їх розташування (рис. Б.5). У цьому випадку можна припустити, що рідке ЕЗ тече по каналах, що мають форму зачорненої фігури на рис. Б.5.

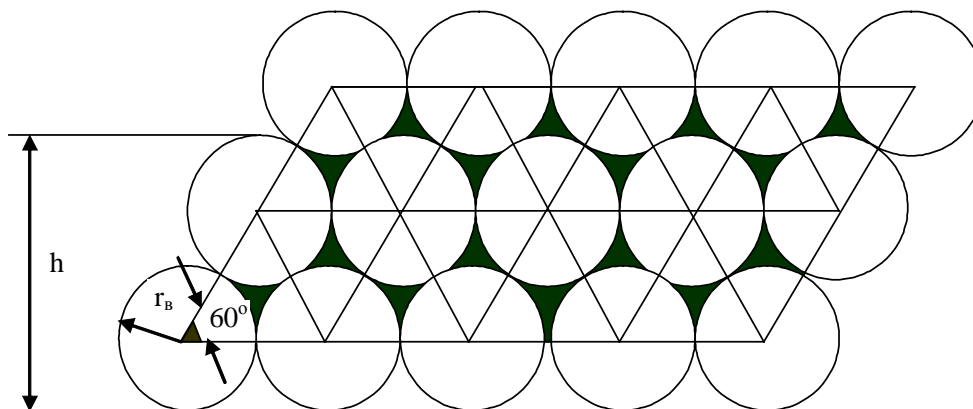


Рис. Б.5. До розрахунку ефективного капілярного радіуса r_{ef} за припущення гексагонального упакування скляних волокон у структурі гранично ущільненого армуючого ВН

Тоді, розрахувавши значення P і S , що входять в рівняння (Б.8), для цього ідеалізованого випадку, будемо мати:

$$r_{ef} = \frac{2S}{\Pi} = \beta d_{\epsilon} \frac{\sqrt{3} - \frac{\pi}{2}}{\pi},$$

де d_{ϵ} – діаметр волокна наповнювача;

β – коефіцієнт звивистості, який можна наближено розрахувати за формулою:

$$\beta = \frac{h}{\ell},$$

де h – висота елементарного шару наповнювача;

ℓ – довжина каналу, що огинає волокна по висоті h .

Висота h у нашому випадку дорівнює:

$$h = d_{\epsilon} \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \right).$$

Без урахування середньої довжини каналу за його перетином, будемо мати:

$$\ell = 0,833 \pi d_{\epsilon}.$$

Тоді

$$\beta = 0,713, \quad r_{ef} = \frac{2S}{\Pi} = \beta d_{\epsilon} \frac{\sqrt{3} - \frac{\pi}{2}}{\pi} = 0,036 d_{\epsilon}.$$

Волокнисті наповнювачі конструкційного призначення, а саме джгутові і ткані на основі скляних волокон, виготовляються із ниток, що мають діаметр елементарних волокон приблизно (9 – 11) мкм.

Тоді $r_{ef} = 0,036 d_{\epsilon} = 0,036 \cdot 10 \text{ мкм} = 0,36 \text{ мкм}$.

МЕТОДИКА АНАЛІТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ РЕЗОНАНСНИХ АКУСТИЧНИХ РОЗМІРІВ СКЛАДАЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ ДОЗОВАНОГО НАНЕСЕННЯ РІДКИХ ЕПОКСИДНИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ НА ПРОСОЧЕНІ ТКАНІ ВОЛОКНИСТІ НАПОВНЮВАЧІ, ТА ВИЗНАЧЕННЯ КОНТРОЛЬОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УЗ [61]

У додатку В висвітлюються питання розрахунку резонансних акустичних розмірів УЗ-перетворювачів, що кріпляться до основи прямокутної плоскої пластини, яка здійснює поздовжні і поперечні згинальні коливання під дією УЗ-перетворювачів [61], та визначення контрольованих технологічних параметрів УЗ [4, 5].

Зазначене обладнання у складі випромінюючої пластини та УЗ-перетворювачів призначене для дозованого нанесення рідких ЕЗ на просочені ткани ВН [27, 61, 131–133].

В.1. Розрахункові рівняння складеного ультразвукового дозуючого пристрою

Розроблювана аналітична методика розрахунку розглядає УЗ-кавітаційний апарат з прямокутною плоскою випромінюючою пластиною (див. рис. 5.1) як резонансну механічну систему й передбачає власне розрахунок резонансних акустичних розмірів елементів, що її утворюють. При цьому для спрощення отримання розрахункових рівнянь зробимо такі припущення:

1) взаємний вплив УЗ-перетворювачів, установлених для забезпечення однорідного поля випромінювання у регулярному порядку уздовж і поперек випромінюючої пластини, є незначним;

2) зневажаємо взаємним впливом згинальних хвиль у поздовжньому й поперечному напрямках випромінюючої пластини, тобто не враховуємо коливання, що викликані гармоніками n -го порядку;

3) вплив озвучуваної рідкої полімерної рідини (внаслідок її відносно невеликої динамічної в'язкості η) на досліджувану коливальну систему також є незначним;

4) у місці контакту УЗ-перетворювачів з випромінюючою пластиною спостерігаються мінімальні акустичні втрати внаслідок високоякісного виконання контактуючих поверхонь. Крім того, площадка контакту повинна бути меншого розміру в порівнянні з напівхвилею згинальної деформації $\ell_{cm}/2$.

Як окремий випадок коливальної системи із шуканою плоскою випромінюючою пластиною може бути розглянута коливальна система на базі чотиригранного стрижня довжиною ℓ_{ct} і площею поперечного перерізу S_{ct} , для

якого власна частота згинальних коливань $f_{\text{ст}}$ може бути знайдена по відомій формулі [135]:

$$f_{\text{cm}} = \frac{\lambda_{\text{cm}}^2}{2\pi\ell_{\text{cm}}^2} \sqrt{\frac{EI_{\text{cm}}g}{\gamma S_{\text{cm}}}} = \frac{\lambda_{\text{cm}}^2}{2\pi\ell_{\text{cm}}} c_{\text{cm}} \sqrt{\frac{I_{\text{cm}}}{S_{\text{cm}}}}, \quad (\text{B.1})$$

де E – модуль пружності матеріалу стрижня щодо розтягання;

I_{cm} – осьовий момент інерції перетину стрижня;

g – прискорення сили тяжіння;

S_{cm} – площа перетину стрижня;

γ – питома вага (щільність) матеріалу стрижня;

λ_{cm} – так званий порядок частоти, що є безрозмірною величиною, і який для випадку УЗК низькочастотного діапазону вибирається залежно від порядку коливань (моди коливань) n_k з наступного ряду [54]:

$$4,750 (n_k = 1); 7,853 (n_k = 2); 10,996 (n_k = 3); 14,137 (n_k = 4); 17,279 (n_k = 5);$$

c_{cm} – швидкість поширення звуку при поздовжніх коливаннях, яка для твердих матеріалів (стрижня) щільністю ρ має наступну залежність [5]:

$$c_{\text{cm}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (\text{B.2})$$

Для стрижня прямокутного перетину шириною $B_{\text{ст}}$ і товщиною $H_{\text{ст}}$ маємо:

$$I_{\text{ст}} = B_{\text{ст}} \cdot H_{\text{ст}}^3 / 12; \quad S_{\text{ст}} = B_{\text{ст}} \cdot H_{\text{ст}},$$

і тоді формула (B.1) приймає вигляд:

$$f_{\text{cm}} = \frac{\lambda_{\text{cm}}^2}{2\pi\ell_{\text{cm}}^2} c_{\text{cm}} \frac{H}{\sqrt{12}}. \quad (\text{B.3})$$

Звідси, знаючи (або задавши наперед) резонансну частоту УЗК $f_{\text{ст}}$, отримаємо для довжини хвилі ℓ_{cm} :

$$\ell_{\text{cm}} = \frac{\lambda_{\text{cm}}}{2} \sqrt{\frac{c_{\text{cm}} \cdot H}{\pi \cdot \sqrt{3} \cdot f_{\text{cm}}}}. \quad (\text{B.4})$$

З формули (B.3) слідує, що власна частота згинальних коливань f_{cm} стрижня не залежить від його ширини $B_{\text{ст}}$. Цей висновок дає можливість використовувати цю залежність для розрахунку згинальних коливань

випромінюючої пластини f_{nl} однакової зі стрижнем товщини $H_{nl} = H_{cm}$, причому розміри цієї пластини (довжина й ширина) повинні бути пропорційні знайденій величині довжини хвилі ℓ_{cm} відповідно до формули (В.4).

Оскільки в УЗ-кавітаційних апаратах із плоскою випромінюючою пластиною постійного перетину передбачається тільки резонансний режим роботи, що є найбільш ефективним з погляду озвучування полімерної рідини, то можна не брати до уваги перехідні процеси, що відбуваються в регулярно встановлених на нижній частині випромінюючої пластини ПЕП.

У такому випадку рівняння поздовжніх коливань складеного ПЕП відповідно до [135] в загальному виді можна записати як:

$$S \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (\text{В.5})$$

де U – поздовжнє переміщення коливань ПЕП;

c – швидкість звуку в матеріалі ПЕП;

S – площа поперечного перерізу ПЕП;

t – час.

Для ПЕП, що здійснює гармонійні коливання і має деяку власну частоту, рішення рівняння (В.5) може бути отримане у вигляді

$$U(x, t) = U(x)(P \sin \omega t + Q \cos \omega t). \quad (\text{В.6})$$

Тоді для накладки 10, що знижує частоту, і прилягаючої до неї п'єзокерамічної шайби 6 (див. рис. 5.3) можна записати відповідно

$$U_1(x, t) = \left(A \cos \frac{\omega}{c_1} x + B \sin \frac{\omega}{c_1} x \right) \sin(\omega t + \varphi), \quad (\text{В.7})$$

і

$$U_2(x, t) = \left(C \cos \frac{\omega}{c_2} x + D \sin \frac{\omega}{c_2} x \right) \sin(\omega t + \varphi), \quad (\text{В.8})$$

де c_1 і c_2 – швидкість звуку в матеріалі накладки 10, що знижує частоту, і п'єзокерамічної шайби 6 відповідно.

Відповідно до розрахункової схеми (рис. 5.3), граничні умови щодо однохвильової коливальної системи з початком координат у точці O_1 можна представити в наступному виді:

$$U_2 = 0 \quad \text{при } x = 0; \quad (\text{В.9})$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = a_1 + a_2; \quad (\text{В.10})$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_2 \\ E_1 S_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} &= E_2 S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{ при } x = a_2; \quad (\text{B.11})$$

де a_1 , E_1 , S_1 і a_2 , E_2 , S_2 – відповідно товщина, модуль пружності щодо розтягнення і площа поверхні накладки 10, що знижує частоту, і п'єзокерамічної шайби 6 відповідно (див. рис. 5.3).

За умови (B.9) з рівняння (B.8) випливає

$$C = 0. \quad (\text{B.12})$$

Тоді можемо записати

$$U_2(x, t) = D \sin \frac{\omega}{c_2} x \sin(\omega t + \varphi). \quad (\text{B.13})$$

Умова (B.11) дозволяє з урахуванням рівняння (B.7) записати рівність

$$B \cos \frac{\omega}{c_1} (a_1 + a_2) = A \sin \frac{\omega}{c_1} (a_1 + a_2).$$

Звідки

$$B = A \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + a_2). \quad (\text{B.14})$$

Підставивши рівняння (B.14) у рівняння (B.7), отримаємо

$$U_1(x, t) = A \left[\cos \frac{\omega}{c_1} x + \sin \frac{\omega}{c_1} x \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + a_2) \right] \sin(\omega t + \varphi). \quad (\text{B.15})$$

Перша половина граничних умов (B.11) дає можливість з урахуванням рівнянь (B.13) і (B.15) записати

$$D \sin \frac{\omega}{c_2} a_2 = A \left[\cos \frac{\omega}{c_1} a_2 + \sin \frac{\omega}{c_1} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + a_2) \right].$$

Звідки

$$D = \frac{A}{\sin \frac{\omega}{c_2} a_2} \left[\cos \frac{\omega}{c_1} a_2 + \sin \frac{\omega}{c_1} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + a_2) \right]. \quad (\text{B.16})$$

З урахуванням другої половини граничних умов (В.11) після диференціювання рівнянь (В.13) і (В.15) отримаємо:

$$E_1 S_1 \frac{A}{c_1} \left[\cos \frac{\omega}{c_1} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + a_2) - \sin \frac{\omega}{c_1} a_2 \right] = E_2 S_2 \frac{D}{c_2} \cos \frac{\omega}{c_2} a_2. \quad (\text{В.17})$$

Спільне рішення рівнянь (В.16) і (В.17) дозволяє отримати співвідношення

$$\frac{E_1 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_1} = \frac{\operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 \left[\cos \frac{\omega}{c_1} a_2 + \sin \frac{\omega}{c_1} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + a_2) \right]}{\cos \frac{\omega}{c_1} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + a_2) - \sin \frac{\omega}{c_1} a_2}. \quad (\text{В.18})$$

Рішення рівняння (В.18) відносно товщини накладки a_1 , що знижує частоту, дає наступний вираз:

$$a_1 = \frac{c_1}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_2 S_2 c_1 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 + E_1 S_1 c_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} a_2}{E_1 S_1 c_2 - E_2 S_2 c_1 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} a_2} - a_2. \quad (\text{В.19})$$

З урахуванням співвідношення

$$\omega = 2\pi f, \quad (\text{В.20})$$

де f – частота коливань УЗ-генератора, рівняння (В.19) дозволяє розрахувати товщину a_1 накладки 10, що знижує частоту, при заданих параметрах її матеріалу й геометрії (E_1 , S_1 , c_1), а також обраному матеріалі й типорозмірі (E_2 , S_2 , c_2) п'єзокерамічної шайби 6 (див. рис. 5.3).

У випадку, якщо друга накладка 8, що знижує частоту, виконана з того ж самого матеріалу, що й перша накладка 10 (демпфер), будемо мати $a_1 = a_1'$. У протилежному випадку для визначення a_1' необхідно знову скористатися формулою (В.19), замінивши в ній E_1 , c_1 відповідно на E_3 , c_3 , тобто

$$a_1' = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_2 S_2 c_3 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 + E_3 S_1 c_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_2}{E_3 S_1 c_2 - E_2 S_2 c_3 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c_2} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_2} - a_2. \quad (\text{В.21})$$

Якщо задати конструктивно необхідне значення розміру товщини a_1 знижуючої частоту накладки 10 УЗ-перетворювача й значення розміру товщини a_2 п'єзокерамічного кільця 6, що передбачено використати в конструкції, за допомогою виразу (В.21) можна отримати величину зсуву п'єзокерамічних кілець 6 щодо вузлової точки P (див. рис. 5.3) з мінімальною амплітудою коливань і максимально навантаженим режимом роботи.

Переходячи відповідно до обраної розрахункової схеми до системи відліку O_2 (див. рис. 5.3), можемо розрахувати акустичні розміри УЗ-трансформатора швидкості, роль якого в розглянутій схемі виконує ступінчастий концентратор з різною площею поперечного перерізу двох ступенів (циліндричної форми), а саме S_1 і S_3 .

Для розрахунку акустичних розмірів ступені меншого діаметра УЗ-трансформатора швидкості 11 також скористаємося загальною формою рівняння поздовжніх коливань (В.5). Оскільки й у цьому випадку справедливе припущення про те, що двоступінчастий концентратор циліндричної форми має власну частоту коливань і здійснює гармонійні коливання, рішення рівняння (В.12) для двоступінчастого концентратора можна представити так:

$$U_3(x, t) = \left(A_1 \cos \frac{\omega}{c_3} x + B_1 \sin \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi). \quad (\text{В.22})$$

Для спрощення будемо вважати, що двоступінчастий концентратор коливань і прилягаюча до нього накладка 8, що знижає частоту, ПЕП 6 виготовлені з одного матеріалу, тобто мають однакові значення відповідних величин E_3 , c_3 . Як правило, для зменшення втрат звукової енергії вони й виконуються як одне ціле.

Так само для циліндра (рис. 5.3), еквівалентного *по масі* секції (пропорційної частини) випромінюючої пластини 1 з елементами її кріплення до концентратора коливань (виділено пунктиром на рис. 5.1), що здійснює згинальні коливання із трансформатором швидкості як одне ціле, маємо:

$$U_4(x, t) = \left(C_1 \cos \frac{\omega}{c_4} x + D_1 \sin \frac{\omega}{c_4} x \right) \sin(\omega t + \varphi), \quad (\text{В.23})$$

де c_4 – швидкість звуку в матеріалі циліндра, еквівалентного *по масі* елементу з поверхнею випромінюючої пластини 1.

Граничні умови щодо досліджуваної коливальної системи з початком координат у точці O_2 можуть бути записані як

$$U_3 = 0 \quad \text{при} \quad x = a_3; \quad (\text{В.24})$$

$$\left. \begin{aligned} U_3 &= U_4 \\ E_3 S_3 \frac{\partial U_3}{\partial x} &= E_4 S_4 \frac{\partial U_4}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{ при } x = 0; \quad (\text{B.25})$$

$$\frac{\partial U_4}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = -b, \quad (\text{B.26})$$

де E_4 – модуль пружності щодо розтягання матеріалу випромінюючої пластини 1;

S_3 і S_4 – площі поперечного перерізу ступені концентратора 11 меншого діаметра й еквівалентного циліндра відповідно;

a_3 – довжина ступені концентратора 11 меншого діаметра;

b – висота еквівалентного циліндра, тобто циліндра, еквівалентного по масі (складовій) секції випромінюючої пластини 1.

З рівняння (B.22) за умови (B.24) отримаємо

$$A_1 \cos \frac{\omega}{c_3} a_3 = -B_1 \sin \frac{\omega}{c_3} a_3,$$

звідки

$$B_1 = -\frac{A_1}{\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3}. \quad (\text{B.27})$$

З огляду на першу частину умови (B.25), з рівнянь (B.22) і (B.23) маємо:

$$A_1 = C_1. \quad (\text{B.28})$$

Друга частина умови (B.25) може бути перетворена до виду:

$$E_3 S_3 c_4 B = E_4 S_4 c_3 D. \quad (\text{B.29})$$

Умова (B.26) дозволяє з рівняння (B.23) отримати

$$-C_1 \sin \left[\frac{\omega}{c_4} (-b) \right] + D_1 \cos \left[\frac{\omega}{c_4} (-b) \right] = 0.$$

Звідки маємо

$$D_1 = -C_1 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_4} b. \quad (\text{B.30})$$

Тоді, з урахуванням (В.29), можна записати

$$\frac{A_1}{\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3} E_3 S_3 c_4 = C_1 E_4 S_4 c_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_4} b,$$

або, враховуючи рівняння (В.28), отримаємо:

$$\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_4} b = \frac{E_3 S_3 c_4}{E_4 S_4 c_3}. \quad (\text{В.31})$$

Звідки можна остаточно записати:

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 S_3 c_4}{E_4 S_4 c_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_4} b}. \quad (\text{В.32})$$

Довжину ступеня ℓ більшого діаметра двоступінчастого концентратора визначимо з виразу (В.32), з огляду на те, що у випадку відсутності на кінці двоступінчастого концентратора навантаження у вигляді випромінюючої пластини 1 з елементами кріплення, $b = 0$ і $a_3 = l$:

$$l = \frac{c_3}{\omega} \frac{(2n_k - 1)\pi}{2}. \quad (\text{В.33})$$

У нашому випадку маємо для трансформатора швидкості з 1/2-хвильовою акустичною системою, коли довжина однієї ступені дорівнює $(1/4)\lambda$ і $n_k = 1$:

$$\ell = \frac{c_3}{\omega} \frac{\pi}{2} = \frac{c_3}{4f}. \quad (\text{В.34})$$

В.2. Послідовність практичної реалізації методики аналітичного розрахунку резонансних акустичних розмірів складеного ультразвукового дозуючого обладнання

Практична реалізація аналітичної методики розрахунку резонансних акустичних розмірів складових елементів УЗ-дозуючого обладнання складається з наступних послідовних кроків:

1) Задаються бажаною резонансною частотою УЗК $f_{\text{ст}}$, характерною для конкретного технологічного процесу (дозованого нанесення), і визначають

інтенсивність УЗ-кавітації (наприклад, це може бути частота УЗК УЗГ 7 – див. рис. 6.3).

2) Вибирають конкретний матеріал ($c_{nl} = c_4$, $E_{nl} = E_4$) і товщину H_{nl} випромінюючої пластини 1 (див. рис. 6.1), виходячи з конструктивно-технологічних особливостей реалізації досліджуваного технологічного процесу (дозованого нанесення).

3) Для обраної резонансної частоти УЗК $f_{ст}$ визначають по формулі (В.4) довжину хвилі $\ell_{ст}$ згинальних коливань випромінюючої пластини 1 з урахуванням бажаної моди коливань n_k (або порядку частоти $\lambda_{ст}$).

4) Загальні розміри випромінюючої пластини 1, тобто її довжину L_{nl} і ширину B_{nl} вибирають кратними величині довжини хвилі $\ell_{ст}$, тобто $L_{nl} = N_L \ell_{ст}$, $B_{nl} = M_B \ell_{ст}$.

5) Залежно від отриманої кількості пучностей, що утворюються при згинальних коливаннях з довжиною хвилі $\ell_{ст}$, уздовж і поперек випромінюючої пластини 1, визначають кількість УЗ-випромінювачів, які необхідно встановити по довжині й ширині пластини. При цьому максимальна кількість УЗ-випромінювачів, установлених по довжині пластини L_{nl} для одержання рівномірної інтенсивності випромінюючої поверхні дорівнює: $N = 2N_L - 1$, а максимальна кількість УЗ-випромінювачів, які встановлюються по ширині випромінюючої пластини B_{nl} , дорівнює $M = 2M_B - 1$.

6) Розраховують масу елементів кріплення УЗ-випромінювача з урахуванням приєднаної маси окремої ділянки (секції) випромінюючої пластини, тобто характеристики еквівалентного циліндра (γ_4 , c_4 , E_4 , S_4).

7) Під резонансну частоту $f_{ст} = f_{пл}$ випромінюючої пластини 1 розраховують акустичні розміри елементів складеного УЗ-випромінювача (a_1 , a_3 , ℓ). Вихідними даними для таких розрахунків є геометричні розміри і фізичні параметри застосовуваного п'єзоматеріала 6 (a_2 , c_2 , E_2 , S_2), трансформатора швидкості 11 (c_3 , E_3 , S_3), частотознижуючих накладок 8, 10 (c_1 , E_1 , S_1), а також питома акустична потужність.

В.3. Методика визначення контрольованих технологічних параметрів складеного кавітаційного апарату з випромінюючою пластиною

Оскільки ефективність роботи досліджуваного кавітаційного апарату з випромінюючою пластиною визначається рівнем кавітації, який досягається при обробці робочого (рідкого полімерного) середовища, а сам апарат, у свою чергу, залежить від ефективності коливань випромінюючої пластини, то *резонансний режим* згинальних коливань випромінюючої пластини є головним чинником, з яким слід узгоджувати резонансну частоту поздовжніх коливань складових ПЕП [94].

Це обумовлено тим, що застосовувані в УЗ-установках ПЕП 6 (див. рис. 6.2) зазвичай є резонансними системами, що працюють на частотах основного резонансу або непарних гармонік.

Нерівномірність акустичного поля згинального випромінювача зменшується, як правило, шляхом оптимального підбору розмірів випромінюючої пластини 1. Енергія до випромінюючої пластини кавітаційного апарату підводиться від УЗГ 7. УЗ-вібратори 5 зафіксовані впритул до випромінюючої пластини 1 за допомогою різьби і зварювання.

Необхідне число секцій з УЗ-вібраторами 5 і їх розміри визначаються, виходячи з необхідної площі випромінюючої поверхні пластини 1 і резонансної частоти її згинальних коливань [5, 94]. Для отримання максимального ефекту сусідні УЗ-випромінювачі підключаються противофазно, а розташовані через один – синфазно.

Оскільки останні можуть живитися як від одного, так і від двох УЗГ 7 (див. рис. 6.2), то у випадку застосування одного УЗГ необхідний протифазний режим роботи досягається врахуванням полярності п'єзоелементів при збиранні відповідних випромінювачів УЗ. Використовувані УЗ-випромінювачі виконують, як правило, за однохвильовою акустичною схемою [4 – 6, 94].

В якості контрольованих параметрів низькочастотних коливань УЗ-діапазону (16 – 24 кГц) вибирали частоту f , інтенсивність I та амплітуду A пружних коливань, що генеруються зовнішньою поверхнею прямокутної випромінюючої пластини в навіколишнє середовище [5]. Частоту пружних коливань вимірювали за допомогою частотоміра ЧЗ-49, амплітуду – за допомогою віброметра, а для вимірювання інтенсивності I (оцінки кількості введеної в середовище акустичної енергії) застосовували вимірювач, що використовує пристрій, який реагує на температурну зміну.

Для цього в калориметричну скляну посудину (з посрібленими стінками і ретельною теплоізоляцією) заливали 200 см³ дистильованої води кімнатної температури (18 °С). Потім посудину ставили на УЗ-установку і піддавали впливу протягом (5 – 10) хв. Початкову і кінцеву температуру всередині калориметричної посудини заміряли термометром. Шукану інтенсивність I УЗ розраховували за формулою (В.35):

$$I = \frac{C_p V_m \gamma (T_2^0 - T_1^0)}{\tau S_k}, \quad [\text{Вт/м}^2], \quad (\text{В.35})$$

де V_m – об'єм озвучуваного середовища (в посудині Дьюара), м³;

C_p – питома теплоємність середовища, Дж/кг·К;

τ – час озвучування, с;

S_k – площа випромінюючої поверхні концентратора УЗ, м²;

T_1^0 і T_2^0 – відповідно початкова і кінцева температура озвучуваного рідкого середовища, °С [5].

Рівномірність кавітаційного поля випромінювача оцінювалася за рівномірністю руйнування тонкої алюмінієвої фольги, встановленої паралельно випромінюючій УЗ поверхні.

ДОВІДКОВІ МАТЕРІАЛИ З ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСФОРМАТОРІВ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

У Додатку Д наведені базові довідкові дані щодо оптимізуючих обмежень, а також схем та розрахункових співвідношень для різних профілів УЗ-концентраторів, включаючи варіант здійснення оптимізації конструктивно-технологічних параметрів досліджуваних концентраторів на базі використання методу експертних оцінок.

Д.1. Використовувані оптимізуючі обмеження

Згідно використовуваному підходу, в якості оптимізуючих обмежень (з використанням методу «експертних оцінок» та з урахуванням вагових коефіцієнтів) приймають сукупність наступних умов:

- досягнення максимально можливого значення коефіцієнта підсилення амплітуди $k_y = k_n$ як для одного, так і для різних матеріалів та конфігурацій профілів;
- мінімальна маса конструкції хвилеводу (його матеріаломісткість);
- максимальна площа торцевої випромінюючої поверхні (виключно для роботи в рідких середовищах);
- існуючі обмеження щодо міцності або максимальної амплітуди (якщо є – див. стовпчик 6 табл. Д.1);
- ступінь стійкості при роботі (мінімальна, проміжна, максимальна);
- надійність у роботі (низька, середня, висока);
- простота (або складність) у виготовленні.

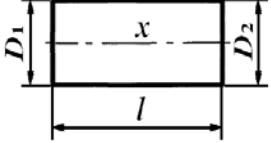
Д.2. Використання методу експертних оцінок для оптимізації вибору конструктивно-технологічних параметрів концентраторів

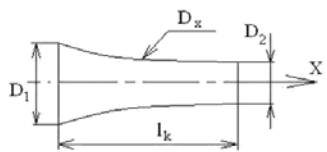
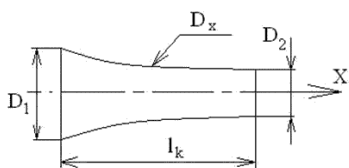
У розділі 4 було зазначено, що оптимальний вибір хвилеводів-концентраторів повинен здійснюватися не тільки за критерієм максимального збільшення амплітуди коливань A , а й беручи до уваги ряд інших факторів з урахуванням їх вагових коефіцієнтів, встановлюваних, наприклад, методом експертних оцінок.

Метод експертних оцінок побудований на використанні відомого методу експертного оцінювання, а саме методу Delphi – Делфі [див., наприклад, <http://faqukr.ru/osvita/32063-u-chomu-poljagae-metod-ekspertnih-ocinok.html>].

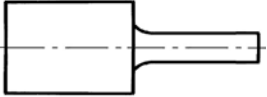
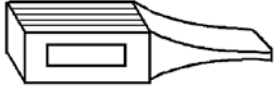
Його основними особливостями вважаються: анонімність, заочність, багаторівневість. Основна ідея методу Делфі полягає в тому, щоб, використовуючи серію певних дій, послідовно домогтися правильного рішення, або хоча б максимального консенсусу. Такими діями можуть бути опитування, інтерв'ю, «мозкові штурми». Проведення аналізу передбачає кілька етапів, а обробку результатів здійснюють за допомогою методів математичної статистики.

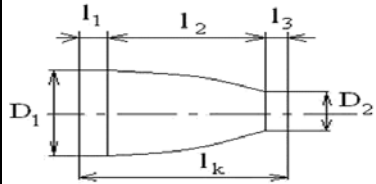
Таблиця Д.1. Схеми та розрахункові співвідношення для профілів УЗ-концентраторів

№	Профіль концентратора	Закон зміни твірної	Теоретичний коефіцієнт посилення $k_y = k_n$	Резонансна напівхвильова довжина $\ell_p (= \ell_k)$ хвилеводу	Особливості, переваги, обмеження
1	2	3	4	5	6
1	Циліндричний 	$D_1 = D_2$	N – це відношення діаметрів: $N = D_1/D_2$; $k_y = N = 1$.	$\ell_p = C/2f$.	$A_{max} \leq 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{-1p}$ [в мм] <u>Переваги:</u> 1. Стійкий в роботі. 2. Простий у виготовленні. <u>Недоліки:</u> 1. Коефіцієнт посилення k_y менше, ніж у інших профілів.
2	Конічний 	$D_x = D_1 (1 - \alpha \cdot x)$; $\alpha = \frac{D_1 - D_2}{D_1 \ell_p}$	$N = D_1/D_2$; $k_y = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \ell_p}{\lambda} \right)^2}$; $k_y < N$	$\ell_p = \frac{\lambda}{2\pi} \nu$ де ν визначається з рівняння $\operatorname{tg} \nu = \frac{\nu}{\nu^2 N \over (1 - N)^2 + 1}$	$A_{max} \leq 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{-1p}$ [в мм] <u>Переваги:</u> 1. Стійкий в роботі. 2. Простий у виготовленні. <u>Недоліки:</u> 1. Коефіцієнт посилення k_y менше, ніж у інших профілів.

1	2	3	4	5	6
3	Круглий стрижень з експонентною зміною перетину 	$D_x = D_1 \cdot e^{-\beta x},$ причому $D_2 = D_1 \cdot e^{-2\beta l_k}$ $\beta = \frac{\omega}{C} \frac{\ln k_y}{\sqrt{\pi^2 + (\ln k_y)^2}} = \frac{2\pi f}{C} \frac{\ln k_y}{\sqrt{\pi^2 + (\ln k_y)^2}}$	$N = D_1/D_2;$ $k_y = N$	$\ell_p = \frac{nC}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln k_y}{n\pi} \right)^2}$	<u>Переваги:</u> 1. Забезпечує високий коефіцієнт підсилення. 2. Стійкий до навантаження. 3. Добре прораховується. <u>Недоліки:</u> 1. Складний у виготовленні.
4	Катеноїдальний (ланцюгова лінія) 	$N = D_1/D_2;$ $D_x = D_2 \cosh \gamma (l_k - x);$ $l_k = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{v^2 + (\operatorname{arch} N)^2}$ де v – найменший позитивний корінь рівняння $v \cdot \operatorname{tg} v = -(\operatorname{arch} N) \sqrt{1 - \frac{1}{N^2}}$	$N = D_1/D_2;$ $k_y = \left \frac{N}{\cos(k' l_k)} \right ;$ $k' = \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 - \gamma^2}$ $\gamma = \frac{1}{l_k} \operatorname{arch} N$ $k_y > N;$	$l_k = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{v^2 + (\operatorname{arch} N)^2}$ де v – найменший позитивний корінь рівняння $v \cdot \operatorname{tg} v = -(\operatorname{arch} N) \sqrt{1 - \frac{1}{N^2}}$	<u>Переваги:</u> 1. Забезпечує високий коефіцієнт підсилення. 2. Стійкий до навантаження. 3. Добре прораховується. <u>Недоліки:</u> 1. Дуже складний у виготовленні.

Продовження таблиці Д.1

1	2	3	4	5	6
5	Двоступінчастий циліндричний 	$D_x = D_1$ при $0 \leq x \leq \ell_p$; $D_x = D_2$ при $\ell_p/2 \leq x \leq \ell_p$;	$N = D_1/D_2$ $k_y = N^2$	$\ell_p = C/2f$.	$A_{max} \leq 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{-1p}$ [в мм] <u>Переваги:</u> 1. Простий в розрахунку і виготовленні. 2. Забезпечує найбільший коефіцієнт посилення k_y . <u>Недоліки:</u> 1. Низька механічна міцність в місцях переходу. 2. Гостра чутливість до навантаження.
6	Ножового типу (прямокутний стрижень з експонентним профілем) 	$D_x = D_1 \cdot e^{-\alpha x/2}$; $\alpha = \frac{2 \ln k_y}{\ell_p}$	$k_y = \sqrt{\frac{b}{b_1}}$	$\ell_p = \frac{nC}{2f} \sqrt{1 + \frac{(\ln k_y)}{(\pi n)}}$	$A_{max} \leq 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{-1p}$ [в мм] <u>Переваги:</u> 1. Простий в розрахунку. 2. Забезпечує найбільший коефіцієнт посилення k_y . 3. Стійкий в роботі. 4. Максимальна механічна міцність. 5. Має максимальну торцеву площу випромінювання, що є перевагою при випромінюванні в рідкі середовища. <u>Недоліки:</u> 1. Відносно складний у виготовленні. 2. Найбільш матеріалоемний (важкий) з усіх концентраторів.

1	2	3	4	5	6
7	<p>Краплеподібний</p>  <p>Складається з трьох ділянок. Ділянки 1 і 3 являють собою частини звичайного ступеневого концентратора. На ділянці 2 механічне напруження максимальне та постійне за величиною.</p>	$\ell_1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{C}{4f}$ $\ell_2 = \frac{\lambda}{4} \sqrt{\ln \frac{D_1}{D_2}}$ $\ell_3 = \frac{\lambda}{2\pi} \arctg\left(\frac{\omega}{C} \ell_2\right)$ $\ell_p = \ell_1 + \ell_2 + \ell_3$ $D_x = D_1 \text{ при } 0 \leq x \leq \ell_1;$ $D_x = D_1 e^{-\left(\frac{1}{4} \frac{\omega^2}{C^2} x^2\right)} \text{ при } \ell_1 \leq x \leq \ell_1 + \ell_2;$ $D_x = D_2 \text{ при } \ell_1 + \ell_2 \leq x \leq \ell_p;$	$k_y = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \sqrt{1 + 4 \ln \frac{D_1}{D_2}}$	$\ell_p = \ell_1 + \ell_2 + \ell_3,$ $\ell_1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{C}{4f}$ $\ell_2 = \frac{\lambda}{4} \sqrt{\ln \frac{D_1}{D_2}}$ $\ell_3 = \frac{\lambda}{2\pi} \arctg\left(\frac{\omega}{C} \ell_2\right)$	$A_{max} \leq 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{-1p} \text{ [в мм]}$ <p><u>Переваги:</u> 1. Високий коефіцієнт підсилення. 2. Простий розрахунок. 3. Стійкий в роботі. 4. Висока рівномірність механічних напружень.</p> <p><u>Недоліки:</u> 1. Відносно складний у виготовленні.</p>

Унікальність методу Делфі полягає в його базовому принципі використання деякої кількості незалежних експертів (при цьому вважається, що найкращий ефект досягається, коли експерти навіть не знають один про одного). Багаторазове використання методу дозволяє прийти до висновку, що оцінювання і прогноз результату неструктурованою групою (колективом) особистостей дає більш високі результати. При цьому відсутнє відкрите зіткнення між так званими носіями протилежних думок.

Метод Делфі позбавляє опонентів від безпосереднього контакту, а також від групового впливу. Опитування проводиться екстериторіально, тобто експерти не збираються в одному місці.

Делфі-метод припускає наявність наступних суб'єктів. Насамперед, це група висококваліфікованих у своїй сфері дослідників. Кожен з цієї групи повинен відповідати в індивідуальному порядку і до того ж письмово. Наступною є організаційна група, яка повинна зводити думки експертів в одне ціле.

У цього методу є властивості, якими не володіють інші методи, що входять у різні типи і класи. Таким чином, Delphi, як інструмент вирішення складних завдань, має ряд переваг. Основне з них - це повна незалежність від впливу авторитету більшості. Суперечка і дискусії відсутні, їх замінюють індивідуальні опитування експертів. Поетапно цей процес виглядає як ланцюг обов'язкових заходів.

На попередньому етапі відбувається підбір групи експертів, як правило, їх кількість не перевищує 20 (на практиці ця кількість становить 3 – 5 осіб). Основний етап включає постановку проблеми, в ході якої експерти отримують питання і приступають до розбивки його на підпитання. Завдання організаційної групи полягає у відборі підпитань, що найчастіше зустрічаються, в результаті «на виході» з'являється лист для опитування.

Цей лист розсилають експертам, які здійснюють його оцінку на предмет повноти інформації та можливості додати ще що-небудь. Так з'являється 20 варіантів, що мають додаткові відповіді з інформацією і аспектами, на основі яких складають наступний лист для опитування.

Вже покращений лист знову розсилають експертам. Тепер їхнє завдання полягає в тому, щоб дати свій оригінальний варіант рішення, плюс до всього необхідно провести розгляд найбільш крайніх точок зору, які надали інші експерти. Оцінка проблеми відбувається у декількох аспектах: забезпеченість ресурсами, ефективність, ступінь відповідності постановці початкової задачі.

Появою переважаючого судження експертів, що зближує їх точки зору, завершується етап-цикл вирішення проблеми. Ознайомивши експертів з доводами, що мають сильну відмінність, пропонується оцінити їх з подальшою можливістю змінити їхню думку. Після цього процедура повторюється.

Кількість етапів, як правило, сягає трьох, але при необхідності їх може бути й більше. Після цього переходять до завершального аналітичного етапу, в ході якого перевіряють узгодженість думок експертів, проводять аналіз отриманих висновків та розроблення кінцевих рекомендацій.

Таким чином, наше завдання зводиться до побудови відповідної

багатокритеріальної цільової функції та знаходження її значення для досліджуваних типів концентраторів.

У табл. Д.2 наведено порівняльні значення конструктивно-технологічних параметрів досліджуваних типів концентраторів №№1-7 відповідно до табл. Д.1. При цьому для отримання репрезентативних результатів будемо апріорі вважати, що досліджувані концентратори виконані з одного і того ж матеріалу, розраховуються для однієї резонансної частоти 20 кГц при забезпеченні максимальної амплітуди на торці $A_{\max} = 50$ мкм.

Таблиця Д.2. Порівняльні значення конструктивно-технологічних параметрів досліджуваних типів концентраторів

конструктивно-технологічний параметр	тип концентратора / експертна оцінка					питома вага показника	сума балів
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	середнє значення		
1	2	3	4	5	6	7	8
циліндричний концентратор							
A (чи k_n) $\rightarrow \max$	3	3	2	2	2,5	0,3	0,75
$\sigma \leq [\sigma]$	5	4	5	5	4,75	0,2	0,95
$m_k \rightarrow \min$	4	5	4	5	4,5	0,2	0,90
технологічність	8	8	8	8	8	0,3	2,40
Разом:						1	5,00
конічний концентратор							
A (k_n) $\rightarrow \max$	3	4	3	4	3,5	0,3	1,05
$\sigma \leq [\sigma]$	5	4	5	5	4,75	0,2	0,95
$m_k \rightarrow \min$	6	5	6	5	5,5	0,2	1,10
технологічність	8	9	8	8	8,25	0,3	2,48
Разом:						1	5,58
круглий стрижень з експоненціальною зміною перетину							
A (чи k_n) $\rightarrow \max$	6	6	7	5	6	0,3	1,80
$\sigma \leq [\sigma]$	6	4	5	5	5	0,2	1,00
$m_k \rightarrow \min$	6	5	6	5	5,5	0,2	1,10
технологічність	8	9	8	8	8,25	0,3	2,48
Разом:						1	6,38
катеноїдальний							
A (чи k_n) $\rightarrow \max$	7	6	7	5	6,25	0,3	1,88
$\sigma \leq [\sigma]$	6	4	5	5	5	0,2	1,00
$m_k \rightarrow \min$	6	5	6	5	5,5	0,2	1,10
технологічність	4	5	5	4	4,5	0,3	1,35
Разом:						1	5,33

1	2	3	4	5	6	7	8
двоступінчастий циліндричний							
A (чи k_n) $\rightarrow \max$	7	8	7	7	7,25	0,3	2,18
$\sigma \leq [\sigma]$	3	4	4	3	3,5	0,2	0,70
$m_k \rightarrow \min$	4	5	4	5	4,5	0,2	0,90
технологічність	8	9	8	8	8,25	0,3	2,48
Разом:						1	6,25
ножового типу з експонентним профілем							
A (чи k_n) $\rightarrow \max$	9	8	9	8	8,5	0,3	2,55
$\sigma \leq [\sigma]$	7	8	8	8	7,75	0,2	1,55
$m_k \rightarrow \min$	4	3	4	4	3,75	0,2	0,75
технологічність	5	5	5	6	5,25	0,3	1,58
Разом:						1	6,43
краплеподібний							
A (чи k_n) $\rightarrow \max$	8	8	7	8	7,75	0,3	2,33
$\sigma \leq [\sigma]$	7	8	7	8	7,5	0,2	1,50
$m_k \rightarrow \min$	6	5	6	7	6	0,2	1,20
технологічність	3	3	3	4	3,25	0,3	0,98
Разом:						1	6,00

Сума балів конструктивно-технологічних параметрів досліджуваних типів концентраторів (рядок №8 табл. Д.2) дорівнює добутку середнього значення експертної оцінки поточного показника (рядок №6) на його питому вагу (рядок №7), виражену у відносних одиницях (встановлюється також на базі методу експертних оцінок, виходячи з конкретних технологічних задач).

Як видно з табл. Д.2, оптимальним вибором за даних умов (наприклад, для озвучування рідких ЕК) є експонентний концентратор ножового типу, який, окрім максимальної торцевої площі випромінюючої поверхні, має ще й максимальну суму балів конструктивно-технологічних параметрів серед порівнюваних концентраторів.

СПІВВІДНОШЕННЯ, ЩО ВИКОРИСТОВУВАЛИСЬ ПРИ ПРОВЕДЕННІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З ДЕТЕРМІНУВАННЯ РОЗПОДІЛУ ВІДСТАНЕЙ МІЖ СУСІДНІМИ КОЛАМИ В МОДЕЛЬНІЙ РЕШІТЧАСТІЙ ПЛОЩИНІ

Опишемо деякі методологічні процедури та наведемо співвідношення, що використовувались при проведенні комп'ютерного моделювання з отримання модельних кривих розподілів відстаней між довжинами екстхорд множини сусідніх кіл. Ці співвідношення використовувались при створенні спеціалізованого програмного забезпечення (прикладної програми на мові Фортран-95).

Для отримання репрезентативних кривих розподілів довжин екстхорд суміжних кіл (волокон в поперечному перерізі шліфа затверділого орієнтованого КВМ) і характеристик геометричної моделі ОВН, параметри випадкової січної прямої $Y_d = k_L X + D_L$, а саме її кутовий коефіцієнт ($k_L = \tan \beta$) та вільний член D_L , що визначає розташування випадкової січної Y_d щодо початку координат O модельної площини (див. рис. Е.1), вибирали у вигляді випадкових величин, рівномірно розподілених в інтервалі $(0,1)$ [66, 69].

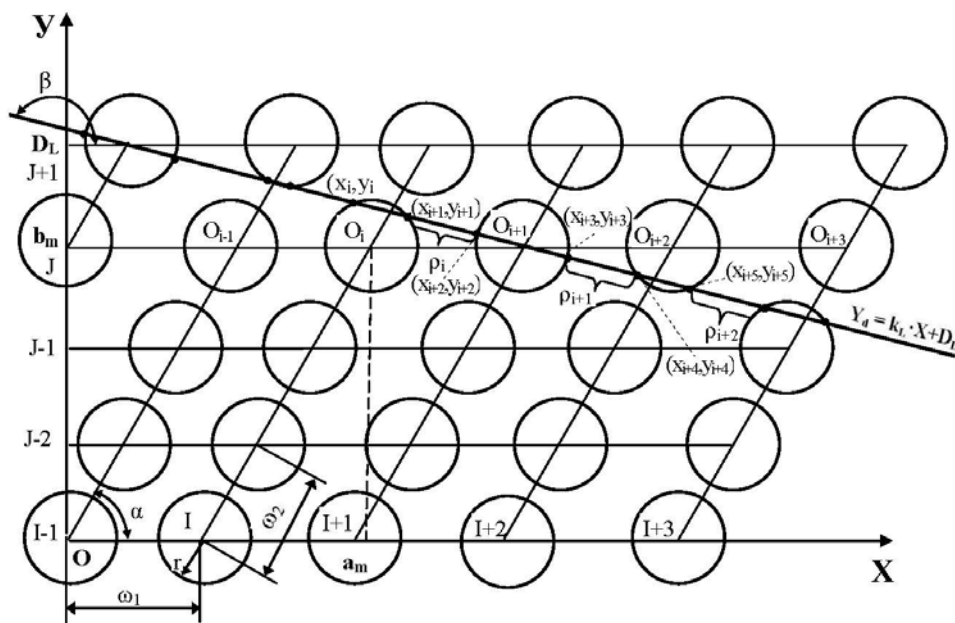


Рис. Е.1. Схема проведення замірів довжин екстхорд суміжних кіл у модельній решітчастій площині при проведенні чисельного експерименту [66, 69]

Причому в загальному випадку одночасно D_L , $\beta = \text{var}$. Остання умову реалізували за допомогою функціонування алгоритму отримання псевдовипадкових чисел в інтервалі $(0,1)$ з використанням методу Монте-Карло.

Область дослідження обмежували колом фіксованого радіуса R_m , що імітує окуляр електронного мікроскопа [66, 141]. Причому значення R_m відповідало приблизно половині граничного значення модельної решітчастої площини P по осі ординат. Для проведення чисельного експерименту вибирали $N_3 = 3000$ замірів у паралелограмній модельної площині розміром 100×100 ЕБК.

Площа F ЕБК з однаковими вузловими колами радіуса r , побудованої на векторах ω_1 і ω_2 , дорівнює сумі площі перетину вузлових кіл F_a і площі F_s , розташованої між вузловими колами:

$$F = F_a + F_s; \quad F = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \sin \alpha; \quad F_a = \pi \cdot r^2. \quad (E.1)$$

Загальна кількість вузлових кіл у всіх ЕБК модельної решітчастої області, розташованих всередині кола радіуса R_m , дорівнює:

$$M = \frac{\pi R_m^2}{F}. \quad (E.2)$$

Середнє число перетинань (тобто шукана кількість замірів N_3 у модельній площині) випадкової січної Y_d довжини L з вузловими колами при одному «киданні» січної прямої дорівнює:

$$N_3 = \frac{4L}{F} = \frac{4L}{\omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \sin \alpha}. \quad (E.3)$$

Однак на практиці фактичне значення кількості замірів $N_{\text{факт}}$ дещо менше числа N_3 , визначеного з (E.3) через неврахування в розробленому алгоритмі кіл, розташованих на кордонах решітчастої модельної площини. Для довільного вузлового кола O_i з порядковим номером вузла сітки I уздовж осі OX , а вздовж осі OY – J , абсциса a_m і ордината b_m (I, J)-го вузла сітки дорівнюють відповідно:

$$a_m = I\omega_1 + J\omega_2 \cos \alpha; \quad b_m = J\omega_2 \sin \alpha. \quad (E.4)$$

Значення вільного члена D_L випадкової січної Y_d у «локальній» системі координат з центром O_i дорівнює:

$$d_0 = a_m \tan \beta + D_L - b_m. \quad (E.5)$$

Довжина ρ_i екстхорди між двома суміжними колами з центрами O_i і O_{i+1} (див. рис.Е.1) в обраній локальній системі координат дорівнює:

$$\rho_i = \sqrt{(x_{i+2} - x_{i+1})^2 + (y_{i+2} - y_{i+1})^2}, \quad (E.6)$$

де x_i, y_i – точки перетину випадкової січної Y_d з колом з центром O_i , які є коренями квадратного рівняння:

$$\chi_1 \cdot x^2 + \chi_2 \cdot x + \chi_3 = 0. \quad (E.7)$$

Коефіцієнти квадратного рівняння (E.7) дорівнюють:

$$\chi_1 = k_L^2 + 1, \chi_2 = 2k_L \cdot d_o, \chi_3 = d_o^2 - r^2. \quad (E.8)$$

Шукані корні x_1, x_2 квадратного рівняння (E.8) дорівнюють:

$$x_1 = -\frac{\chi_2 + \text{sign}(\chi_2) \cdot \sqrt{\chi_2^2 - 4\chi_1 \cdot \chi_3}}{2\chi_1}; \quad x_2 = \frac{\chi_3}{\chi_1 \cdot x_1}. \quad (E.9)$$

Встановлено, що рішення (E.9) дають мінімальну втрату вірних знаків при обчисленні корнів квадратного рівняння. Причому для зменшення величини похибки при обчисленні коренів кожного поточного квадратного рівняння (E.7), яка зростає з ростом порядкового номера вузлових координат (I, J) перетинаемого вузлового кола в модельній площині, необхідно ці корені обчислювати в локальній системі координат (a_m, b_m) з подвійною точністю [66].

Шукані корені в «глобальній» декартовій системі координат ОХУ (див. рис. E.1) дорівнюють [66, 141]:

$$X_{1,2} = x_{1,2} + a_m; \quad Y_{1,2} = y_{1,2} + b_m. \quad (E.10)$$

**ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСАД, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ
ЕНЕРГООЩАДНІСТЬ ПРОЦЕСІВ ОБ'ЄМНОГО ОЗВУЧУВАННЯ,
ПРОСОЧУВАННЯ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ І ДОЗОВАНОГО
НАНЕСЕННЯ ЕПОКСИДНИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ З ВИКОРИСТАННЯМ
УЛЬТРАЗВУКУ**

Ж.1. Особливості реалізації розроблених технологічних засад і обладнання для процесів просочування волокнистих наповнювачів та дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих із застосуванням УЗ-модифікації

У цьому додатку описані деякі особливості розроблених технологічних засад і обладнання для просочування волокнистих наповнювачів та дозованого нанесення полімерного зв'язуючого із застосуванням УЗ-модифікації.

На рис. Ж.1, *а* показана схема загального розташування пластин пристрою, які розміщені до просочувальної ванни; на рис. Ж.1, *б* показана схема розташування пластин пристрою паралельно поверхні матеріалу, що обробляється, і на змінній відстані від нього; на рис. Ж.1, *в* показана схема несиметричного розташування пари пластин пристрою, розміщених між просочувальною ванною і засобом віджиму; на рис. Ж.1, *г* показана схема симетричного розташування пластин пристрою (див. рис. 6.4).

Робочі інструменти 11 і 12 (див. рис. 6.4) можуть розташовуватись паралельно поверхні оброблюваного матеріалу 4, що не просочився, і на змінній відстані δ від нього (що, як правило, не перевищує товщину матеріалу, що просочується – рис. Ж.1, *а*).

У разі використання матеріалів з малою товщиною й рідкою структурою кути нахилу α_3 і α_4 робочих інструментів 11 і 12 до площини матеріалу 4, що обробляється, знаходяться в межах $(0 - 5)^\circ$. При цьому робочі елементи 14 і 15 контактують з матеріалом 4, що не просочився і що обробляється, ребром краю випромінюючої пластини (рис. Ж.1, *б*).

При установці пластин 11 і 12 (див. рис. 6.7) одна над іншою по обидва боки матеріалу 4, що просочується (див. рис. Ж.1, *в*), напруга збудження подається на пакети із зсувом по фазі і в певній послідовності. Завдяки цьому досягається переміщення пучності (амплітуди) хвилі УЗК від контактуючого ребра до протилежного напрямку переміщення матеріалу грані випромінюючої пластини.

Варіантом пристрою, що описується, є розташування робочих інструментів, які розміщені до засобу для нанесення ЕЗ, паралельно поверхні ВН, що обробляється, і на змінній відстані від нього для виключення травмування як поверхні волокон, так і структури тканини наповнювача.

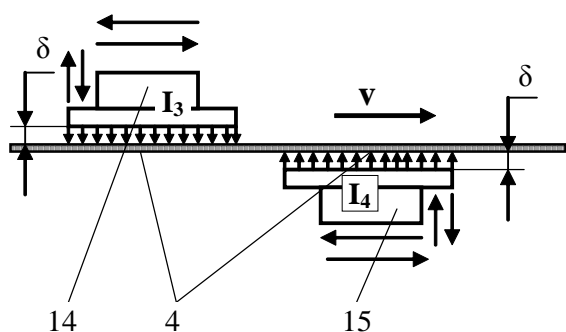


Рис. Ж.1, а. Елемент рис. 6.4 пристрою [138]. Пояснення в тексті.

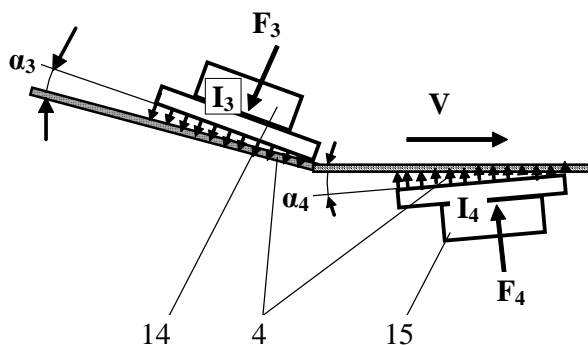


Рис. Ж.1, б. Елемент рис. 6.4 пристрою [138]. Пояснення в тексті.

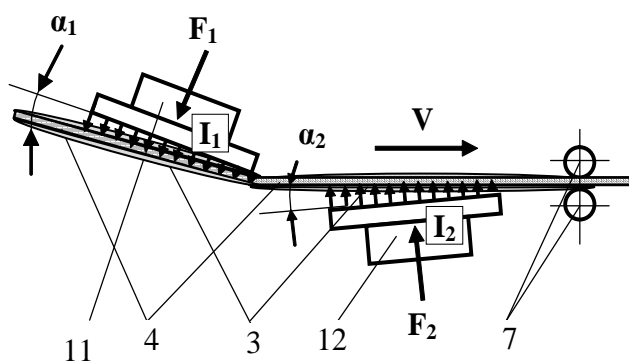


Рис. Ж.1, в. Елемент рис. 6.4 пристрою [138]. Пояснення в тексті.

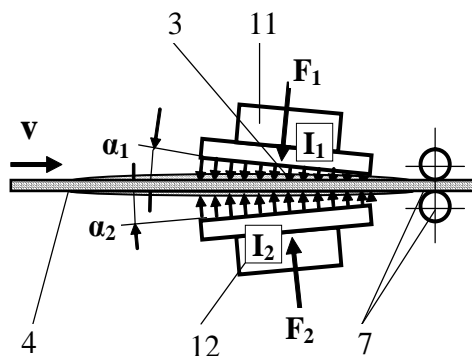


Рис. Ж.1, г. Елемент рис. 6.4 пристрою [138]. Пояснення в тексті.

З цією ж метою можлива установка робочих інструментів пристрою, які розміщені до засобу для нанесення ЕЗ, і з кутами нахилу до площини матеріалу, що обробляється, в межах $(0 - 5)^\circ$. При цьому робочі елементи контактують з ВН, що обробляється, ребром краю випромінюючої пластини.

Охарактеризуємо використання і взаємне розташування робочих інструментів в пристрої, що пропонується.

Використання як першої, так і другої пари робочих елементів у вигляді прямокутної випромінюючої пластини, нахиленої до поверхні матеріалу, що обробляється, під гострим кутом, сприяє як ефективній активації поверхні наповнювача, що непросочився, і його дегазації, так і попередній обробці зв'язуючого краєм випромінюючої пластини з більш глибоким проникненням зв'язуючого в пори матеріалу, що скупчується перед ребром пластини, особливо при симетричній установці випромінюючих пластин.

Наявність індивідуальних приводів до кожного перетворювача в парі робочих інструментів, розташованих до засобу для нанесення зв'язуючого на матеріал, що просочується, і попереднього просочування, дозволяє проводити ефективну і локалізовану обробку наповнювача, що непросочився, із змінними значеннями інтенсивності і амплітуди коливань у залежності від матеріалу (його товщини, що обробляється, структури, попередньої поверхневої обробки волокон – наявності апретів, замаслювачів тощо).

У разі застосування наповнювачів з малою товщиною і розрідженою структурою використовуються робочі інструменти із змінними кутами нахилу до площини матеріалу, що непросочився, і який обробляється, в межах $(0 - 5)^\circ$. При цьому робочі елементи контактують з матеріалом, що обробляється, тільки ребром краю випромінюючої пластини.

У разі застосування більш щільних і міцних тканих матеріалів, таких як конструкційні склотканини тощо, взаємодія здійснюється з дозованим зусиллям притискання і притому по всій площі випромінюючої поверхні пластини.

Ефективні змінні параметри процесу УЗ-обробки (час обробки $t_{уз}$, амплітуду A , частоту f , інтенсивність I) визначають експериментально в кожному конкретному випадку, наприклад, із застосування методів експериментально-статистичного моделювання.

Ще однією перевагою застосування пристрою, що пропонується, є зменшення діапазону кутів нахилу першої пари робочих інструментів, встановлених до засобу віджиму, а саме з $(10 - 45)^\circ$ (як в пристрої прототипу) до $(5 - 30)^\circ$ (в пристрої, що пропонується) за рахунок ефективної попередньої УЗ-активації наповнювача, що непросочився (тобто своєрідної передпросочувальної підготовки наповнювача) при збереженні властивостей кінцевого виробу (процента зв'язуючого в наповнювачі, міри просочування і фізико-механічних властивостей).

Ж.2. Переваги розроблених технологічних засад для процесів просочування волокнистих наповнювачів і дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих на просочені волокнисті наповнювачі із застосуванням УЗ-модифікації

В розроблених технологічних засадах для процесів просочування і дозованого нанесення зв'язуючого на довгомірний волокнистий матеріал його УЗ-активацію здійснюють шляхом двостороннього асинхронного контактного впливу випромінювачами УЗК на поверхню матеріалу із заздалегідь нанесеним на нього зв'язуючим при симетричній подачі УЗК з регулюванням їх інтенсивності і кута подачі до поверхні цього матеріалу.

Причому як випромінювачі УЗК використовують як ПМС, так і п'єзоелектричні перетворювачі, що з'єднані із площинною випромінюючою пластиною.

Згідно із засадами, здійснюють попередню двосторонню контактну УЗ-обробку поверхні тканого матеріалу, що непросочився, при симетричній подачі коливань з регулюванням їх інтенсивності і кута подачі до поверхні цього

матеріалу. Причому контактний вплив УЗК на матеріал, що непросочився, а також на матеріал із заздалегідь нанесеним на нього зв'язуючим, здійснюють із дозованим зусиллям притискання поверхні випромінювачів до поверхні матеріалу, що обробляється.

Здійснюють попередню двосторонню безконтактну УЗ-обробку поверхні матеріалу, що непросочився.

Відповідно до розроблених засад, попередню двосторонню УЗ-обробку поверхні матеріалу, що непросочився, здійснюють на частоті коливань (18 – 22) кГц, амплітуді (2 – 5) мкм, інтенсивності (2 – 5) Вт/см² протягом (0,5 – 10) с із зусиллям притискання (5 – 10) Н при варіюванні кута подачі коливань до поверхні матеріалу (0 – 5)°.

Контактний вплив на поверхню матеріалу із заздалегідь нанесеним на нього зв'язуючим здійснюють на частоті коливань (18 – 22) кГц, амплітуді (3 – 5) мкм, інтенсивності (2 – 5) Вт/см² протягом (0,5 – 5) с із зусиллям притискання (5 – 15) Н при варіюванні кута подачі коливань до поверхні матеріалу (5 – 30)° і зсуві їх по фазі (0 – 90)°.

Розроблені технологічні засади реалізують за допомогою вище описаного пристрою (див. рис. 6.4 та рис. Ж.1) таким чином. Після змотування з бобіни 5 матеріалу 4 здійснюється його одностороннє передпросочування з однієї сторони зв'язуючим 2 за допомогою наносного валу 17, що обертається у місткості 18 з озвученим зв'язуючим 2.

У разі використання матеріалів з малою товщиною і рідкою структурою робочі інструменти 14 і 15 розташовують паралельно поверхні матеріалу 4, що не просочився і який обробляється, на змінній відстані δ від нього (що, як правило, не перевищує товщину матеріалу, що просочується), або під кутами нахилу α_3 і α_4 до площини матеріалу 4, що обробляється, які лежать у межах (0 – 5)°. При цьому робочі елементи 14 і 15 контактують з цим матеріалом ребром краю випромінюючої пластини (див. рис. Ж.1, а, Ж.1, б).

Після цього передпросочений матеріал 4 поступає в просочувальну ванну 1, де він просочується зв'язуючим 2. Після виходу із ванни забезпечується попереднє неконтрольоване нанесення зв'язуючого 2 на матеріал 4, що заздалегідь просочився.

Матеріал 4, що просочився, обробляють з двох сторін УЗ-перетворювачами у вигляді випромінюючих прямокутних пластин 11 і 12, що мають індивідуальні приводи від УЗГ 13, і які виконані у вигляді ПМС. Останні контактують з матеріалом 4, що просочився і який обробляється, ребром краю прямокутної випромінюючої пластини із змінним зусиллями притискання F_1 і F_2 відповідно.

Причому робочі інструменти 11 і 12 розташовані зі зміщенням один відносно одного по довжині матеріалу 4, що обробляється, по обидві сторони відносно нього і під різними кутами нахилу α_1 і α_2 до площини матеріалу, що лежать в межах (5 – 30)°.

Варіювання вмісту зв'язуючого, рівномірність його розподілу в матеріалі і видалення надлишку зв'язуючого здійснюють регулюванням кута нахилу α_1 і α_2 випромінюючої пластини до поверхні матеріалу 4, зміною потужності

(інтенсивності I_1 і I_2), що підводиться до перетворювачів, а також дозуванням зусиль притискання F_1 і F_2 .

У процесі руху матеріалу 4, що просочився, і при його входженні в область, що утворена випромінюючою пластиною 11 першого ПМС і проекцією пластини 11 на матеріал 4, зв'язуюче 2, яке знаходиться як всередині матеріалу 4, так і на його поверхні, зазнає впливу УЗК. Внаслідок енергії, переносимої УЗК, зв'язуюче 2 розігрівається (меншає його в'язкість), а також "проганяється" через товщу матеріалу 4 на протилежну сторону. Остаточні надлишки зв'язуючого видаляються ребром краю випромінюючої пластини 11, що відіграє також роль скребачки.

Далі аналогічна картина повторюється у ПМС 12, встановленого на регульованій відстані з протилежної сторони від матеріалу 4, що просочився. При видаленні надлишку високов'язких зв'язуючих кут нахилу пластин (α_1 і α_2) і інтенсивність коливань (I_1 і I_2) збільшується, і навпаки.

Остаточний віджим зв'язуючого проводиться засобом віджиму матеріалу, що просочився, виконаного у вигляді двох віджимних валків 7. Після цього віджатиї матеріал, що просочився, поступає в сушильну камеру 8, у якій розташовані секції попереднього і остаточного сушіння, і після сушіння намотується на приймальну бобіну 10.

У даному пристрої несинхронні УЗК утворюються послідовністю чередування вузлів пучностей і западин при розповсюдженні фронту хвилі протилежно напрямку руху матеріалу.

При цьому амплітуда пучностей коливань послідовно переміщується в площині коливань (у площині випромінюючої пластини) від контактуючого ребра випромінюючої пластини до протилежного ребра, тобто досягається аналогія перистальтичного переміщення рідких і пастоподібних середовищ.

Це забезпечує як переміщення зв'язуючого, так і видалення його надлишків з поверхні рухомого матеріалу. Перевагою розроблених технологічних засад є й збільшення верхньої межі зусилля натягнення матеріалу при видаленні надлишків зв'язуючого з його поверхні, а також відсутність залежності величини нанесення зв'язуючого від певного діапазону швидкості протягування матеріалу, що просочився.

Адже в способі прототипу [41] при високих швидкостях протягування в процесі просочування матеріалу при вході його у ванну і контактування із зв'язуючим відбувається попадання атмосферного повітря між зв'язуючим і матеріалом.

При цьому у разі використання низьков'язких зв'язуючих пухирці повітря лопаються, утворюючи раковини. У разі ж застосування високов'язких складів частина пухирців залишається і в нанесеному на матеріал шарі зв'язуючого. При використанні високов'язких зв'язуючих кут подачі коливань α , як і інтенсивність УЗК, збільшується, і навпаки. Значення цих величин встановлюються експериментально.

Ж.3. Оптимізація параметрів процесу дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих на склоткані наповнювачі з використанням УЗ

Оптимізацію параметрів процесу дозованого нанесення ЕЗ на склоткані наповнювачі з використанням УЗК здійснювали за попередньої детермінізації діапазонів режимних параметрів цього процесу, марок склотканих матеріалів і ЕЗ, виходячи з умов технологічних регламентів виготовлення конкретних матеріалів (фольгованих діелектриків).

Для експериментально досліджених склотканих матеріалів марок "ЕЗ-200" і "Т-10-80" шириною 1000 мм, що просочували епоксидними зв'язуючими УП-631 і ЕДТ-10 при температурі 30 °С (значення в'язкості зв'язуючих становило відповідно 2,21 і 1,83 Па·с), значення кутів нахилу випромінюючих пластин до поверхні матеріалу становили (10 – 30)°.

Інтенсивність УЗК складала (2 – 5) Вт/см². Швидкість протягування варіювалася в межах (0,01 – 0,05) м/с. Габарити кожної з двох випромінюючих пластин становили (600 x 150 x 10) мм, амплітуда коливань (2 – 5) мкм, сумарна вихідна потужність 8 кВт, частота (18 – 22) кГц, зусилля притискання (5 – 15) Н. Величина нанесення зв'язуючого на просочені склотканини становила (35 – 40) %.

Завданням проведених досліджень було одержання із застосуванням математичних методів планування експериментів адекватних статистичних моделей, що описують вихідні змінні в залежності від вхідних змінних для процесу дозованого нанесу ЕЗ на тканий ВН шляхом УЗ-обробки.

Очікувалось, що це дозволить прогнозувати параметри цього процесу, а також спрямовано регулювати склад і кінцеві властивості просочених і висушених виробів (препрегів) при одержанні тканих епоксидних композитів.

На основі проведеного аналізу наявних літературних даних [41] та результатів пасивних (тобто вже проведених) експериментів були визначені вхідні змінні (фактори), що впливають на якісні показники вихідні змінні тканого епоксидного композиту, а саме на величину нанесення зв'язуючого С (%) на просочений тканий матеріал. Вони після ранжування за ступенем впливу на вихідні змінні були розташовані в такій послідовності:

X_1 – частота УЗК f , кГц;

X_2 – час контактної УЗ-обробки непрорсоченої склотканини $t_{уз}$, с;

X_3 – швидкість протягування матеріалу у просочувальній ванні V , м/с;

X_4 – амплітуда УЗК A , мкм;

X_5 – інтенсивність УЗК I , Вт/см²;

X_6 – температура просочування T , °С;

X_7 – зусилля притискання випромінюючої пластини на базі ПМС або п'єзокерамічного перетворювача до тканого матеріалу, що обробляється, F , Н;

X_8 – кут нахилу випромінюючої пластини до поверхні тканого матеріалу, що обробляється α , °;

X_9 – зсув по фазі УЗК випромінюючих пластин (при використанні ПМС) $\Delta\varphi$, °.

Оскільки процес дозованого нанесення ЕЗ на склотканину, як правило, проходить при постійній температурі просочування (T), а такі параметри процесу просочування, що передують процесу дозованого нанесення, як амплітуда УЗК (A), інтенсивність УЗК (I), зусилля притискання (F) випромінюючої пластини до тканого матеріалу, що обробляється, та кут нахилу випромінюючої пластини (α), залежать від обраної схеми процесу і конструкційних та експлуатаційних можливостей електротехнологічного кавітаційного апарату на базі випромінюючих пластин, за допомогою яких здійснюють процеси просочування і дозованого нанесення, то ці параметри, як правило, стабілізують перед початком здійснення цих процесів.

Тоді, відповідно до цих умов, при моделюванні було залишено фактори ($X_1 - X_3$) як вхідні змінні, що найбільше впливають на вихідну змінну, а саме на величину нанесення зв'язуючого на просочений тканий матеріал C , % (Y).

З урахуванням цього шукана математична залежність мала такий вигляд:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_1 \cdot X_1 \cdot X_2 + a_1 \cdot X_1 \cdot X_3 + a_1 \cdot X_2 \cdot X_3, \quad (\text{Ж.1})$$

де a_0, a_1, \dots, a_6 – постійні коефіцієнти моделі (Ж.1), які потрібно знайти.

План експерименту в реальних координатах та значення вихідної змінної наведено у таблиці Ж.1.

Таблиця Ж.1. План експерименту та значення вихідної змінної Y при моделюванні процесу дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих на тканий наповнювач з використанням УЗК в реальних координатах

Номер досліджу	Вхідні змінні (фактори)			Вихідна змінна Y (C , %) для марки склотканини:	
	X_1 (f , кГц)	X_2 ($t_{\text{вз}}$, с)	X_3 (V , м/с)	ЕЗ-200	Т-10-80
1	21,99	9,60	0,013	35	36
2	18,19	8,82	0,014	36	35
3	18,41	8,27	0,013	38	36
4	21,25	1,25	0,019	37	37
5	20,11	3,62	0,033	36	35
6	18,19	1,47	0,025	38	35
7	21,39	4,67	0,032	35	37
8	19,57	1	0,014	39	38
9	19,67	1	0,014	38	37
10	18,99	6,49	0,033	36	36

Рівні та інтервали варіювання факторів, що показані у табл.Ж.2, були вибрані на основі проведеного аналізу наявних літературних даних [41] і результатів пасивного експерименту [132, 133].

Таблиця Ж.2. Рівні та інтервали варіювання факторів при моделюванні процесу дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих на тканий наповнювач з використанням УЗК

Рівень варіювання факторів	Інтервали варіювання факторів для:		
	$X_1 (f_{yz}, \text{кГц})$	$X_2 (t_{yz}, \text{с})$	$X_3 (V, \text{м/с})$
Верхній	22	1	0,035
Нульовий	20	5,5	0,0225
Нижній	18	10	0,01

Вихідні дані для складання матриці планування експерименту у кодованій формі згідно *D*-оптимальному плану наведені в табл. Ж.3.

Таблиця Ж.3. План експерименту та значення вихідної змінної Y при моделюванні процесу дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих на тканий наповнювач з використанням УЗК у кодованій формі

Номер досліджу	Вхідні змінні (фактори)			Вихідна змінна (Y) для марки склотканини:	
	X_1	X_2	X_3	ЕЗ-200	Т-10-80
1	0,9958	0,9113	-0,7205	35	36
2	-0,9002	0,7397	-0,6702	36	35
3	-0,7938	0,6169	-0,7097	38	36
4	0,6284	-0,9442	-0,2399	37	37
5	0,0553	-0,4174	0,8724	36	35
6	-0,9040	-0,8947	0,2212	38	35
7	0,6984	-0,1836	0,7984	35	37
8	-0,2125	-1	-0,6061	39	38
9	-0,1619	-1	-0,6105	38	37
10	-0,5022	0,2206	0,8794	36	36

Згідно з обраною методикою обробки експериментальних даних [97], проводили перевірку однорідності дисперсій та оцінку значимості коефіцієнтів для математичної моделі (Ж.1), одержаної для обох марок досліджуваних склотканин.

Для моделі (Ж.1), отриманої як для склотканини ЕЗ-200, так і для склотканини Т-10-80, табличне значення критерію Кохрена G_T для рівня значимості $q = 0,05$ і числа ступенів свободи $f_1 = 1$, $f_2 = 10$ дорівнює $G_T = 0,602$. Розраховане значення критерію Кохрена дорівнює $G_p = 0,1$. Так як виконується умова $G_p < G_T$, то дисперсії однорідні, тобто паралельні досліди значно не відрізняються.

При визначенні оцінки значимості коефіцієнтів моделі (Ж.1), отриманої для склотканин марок ЕЗ-200 і Т-10-80, табличне значення критерію Стюдента t_T для рівня значимості $q = 0,1$ і числа ступенів свободи $f_i = 10$ дорівнює $t_T = 1,81$.

Тоді для розрахованих значень критерію Стюдента t_p для коефіцієнтів моделі (Ж.1) для склотканин ЕЗ-200 будемо мати:

$a_0 = 36,266$; $t_p = 185,2 \Rightarrow t_p > t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим;

$a_1 = -0,77625$; $t_p = 2,9996 \Rightarrow t_p > t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим;

$a_2 = -1,2597$; $t_p = 3,3276 \Rightarrow t_p > t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим;

$a_3 = -0,64302$; $t_p = 2,5337 \Rightarrow t_p > t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим;

$a_4 = 0,8192$; $t_p = 1,8555 \Rightarrow t_p > t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим;

$a_5 = 0,39361$; $t_p = 0,72176 \Rightarrow t_p < t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) не є значимим, і його можна не приймати до уваги при побудові моделі (Ж.1);

$a_6 = -0,40144$; $t_p = 0,63656 \Rightarrow t_p < t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) не є значимим, і його можна не приймати до уваги при побудові моделі (Ж.1).

Табличне значення іншого досліджуваного критерію, а саме критерію Фішера F_T , для рівня значимості $q = 0,1$ і чисел ступенів свободи $f_1 = 3, f_2 = 10$ для обох досліджуваних марок склотканин дорівнює 2.72. Розраховане значення критерію Фішера F_p для цієї моделі становить: $F_p = 2,28$. Так як $F_p < F_T$, то досліджувана модель (Ж.1) є адекватною (використовується дисперсія відтворюваності).

Шукана математична залежність (Ж.1) для процесу дозованого нанесення епоксидного зв'язуючого ЕДТ-10 на склотканину ЕЗ-200 з використанням УЗК у кодованій формі має наступний вигляд:

$$Y = +36,266 - 0,77625 \cdot X_1 - 1,2597 \cdot X_2 - 0,64302 \cdot X_3 + 0,8192 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,39361 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,40144 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (\text{Ж.2})$$

У таблиці Ж.4 показані середні експериментальні ($Y_{\text{сер.}}$) та розраховані ($Y_{\text{мод.}}$) значення параметру оптимізації Y для просоченої склотканини ЕЗ-200.

Таблиця Ж.4. Середні експериментальні ($Y_{\text{сер.}}$) та розраховані ($Y_{\text{мод.}}$) значення параметру оптимізації Y для просоченої склотканини ЕЗ-200 з використанням УЗК

Номер досліджу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Y_{\text{сер.}}$	35,5	35,5	37,5	36,5	36,5	38,5	35,5	38,5	37,5	35,5
$Y_{\text{мод.}}$	35,53	36,35	36,55	36,48	36,33	38,61	35,61	38,06	37,97	35,47

Аналогічно для розрахованих значень критерію Стюдента t_p для коефіцієнтів моделі (Ж.1) для *склотканини Т-10-80* будемо мати:

$a_0 = 36,736$; $t_p = 187,6 \Rightarrow t_p > t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим;

$a_1 = 0,73247$; $t_p = 3,0518 \Rightarrow t_p > t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим;

$a_2 = 0,73247$; $t_p = 1,9349 \Rightarrow t_p > t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим;

$a_3 = 0,10963$; $t_p = 0,43197 \Rightarrow t_p < t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) не є значимим, і його можна не приймати до уваги при побудові моделі (Ж.1);

$a_4 = 0,88896$; $t_p = 2,0135 \Rightarrow t_p > t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим;

$a_5 = 1,1423$; $t_p = 2,0945 \Rightarrow t_p > t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим;

$a_6 = 2,4313$; $t_p = 3,8553 \Rightarrow t_p < t_T$, тобто цей коефіцієнт моделі (Ж.1) є значимим.

Розраховане значення критерію Фішера F_p для цієї моделі становить: $F_p = 2,6544$. Так як $F_p < F_T$, то досліджувана модель процесу дозованого нанесення епоксидного зв'язуючого ЕДТ-10 на *склотканину Т-10-80* з використанням УЗК також є адекватною.

Шукана математична залежність (Ж.1) для процесу дозованого нанесення епоксидного зв'язуючого ЕДТ-10 на *склотканину Т-10-80* з використанням УЗК у кодованій формі має наступний вигляд:

$$Y = + 36.736 + 0.78977 \cdot X_1 + 0.73247 \cdot X_2 + 0.10963 \cdot X_3 + 0.88896 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1.1423 \cdot X_1 \cdot X_3 + 2.4313 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (\text{Ж.3})$$

У таблиці Ж.5 показані середні експериментальні ($Y_{\text{сер.}}$) та розраховані ($Y_{\text{мод.}}$) значення параметру оптимізації Y для просоченої *склотканини Т-10-80*, що свідчить про задовільний збіг теоретичних і експериментальних даних.

Таблиця Ж.5. Середні експериментальні ($Y_{\text{сер.}}$) і розраховані ($Y_{\text{мод.}}$) значення параметру оптимізації Y для просоченої *склотканини Т-10-80* з використанням УЗК

Номер досліджу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Y_{\text{сер.}}$	36,5	35,5	35,5	36,5	35,5	35,5	37,5	38,5	36,5	36,5
$Y_{\text{мод.}}$	36,50	35,38	35,62	36,36	35,71	35,4	37,40	37,57	37,55	36,46

Для більшої наглядності впливу вхідних змінних ($X_1 - X_3$) на параметр оптимізації Y були побудовані графічні відгуки при фіксованому значенні X_1 . Це було зумовлено тим, що частота УЗК f має незначний інтервал варіювання (18 кГц – 22 кГц), що наперед обумовлено паспортними характеристиками УЗ-генератора (зокрема, марки УЗГ 3-4, що розрахований на вихідну потужність 4 кВт). Тому, розглянувши три варіанти фіксованого значення частоти f УЗК (18 кГц, 20 кГц і 22 кГц), можна отримати практично повну інформацію про вплив цього фактору на шуканий параметр оптимізації (Y).

Крім того, у цьому випадку потрібно також перевірити гіпотезу про відносну стабільність величини нанесення зв'язуючого C при варіюванні інших вхідних змінних, а саме X_2 та X_3 .

На рис. Ж.2 (а – в) показана залежність величини нанесення зв'язуючого C для склотканини марки ЕЗ-200, а на рис. Ж.3 (а – в) показана ця ж залежність для склотканини марки Т-10-80 від часу ультразвукової обробки τ та швидкості протягування склотканини V при частоті УЗК $f = 18$ кГц (а), 20 кГц (б) і 22 кГц (в).

Проаналізувавши графічні відгуки параметру оптимізації (Y), можна зробити висновки про те, що варіювання часу ультразвукової обробки (X_2) і швидкості протягування тканого матеріалу (X_3) при фіксованій інтенсивності I УЗК незначною мірою впливає на величину нанесення зв'язуючого (C) у досліджуваних склотканинах марок ЕЗ-200 та Т-10-80, про що свідчить і те, що відносне відхилення величини нанесення ΔC знаходиться в межах $\pm 5\%$.

Це дозволяє застосовувати цей, знайдений експериментально-статистичним шляхом, діапазон значень вхідних змінних на серійному просочувально-сушильному обладнанні, тобто в промислових умовах, де контроль за вхідними параметрами здійснюється більш м'яко, ніж в лабораторних умовах, що пов'язано із великими габаритами обладнання, а також рекомендувати розроблені нові УЗ-технологічні засади [138, 141] як надійний метод підтримання (стабілізації) наперед заданого значення величини вмісту зв'язуючого (C) у просоченому тканому наповнювачі.

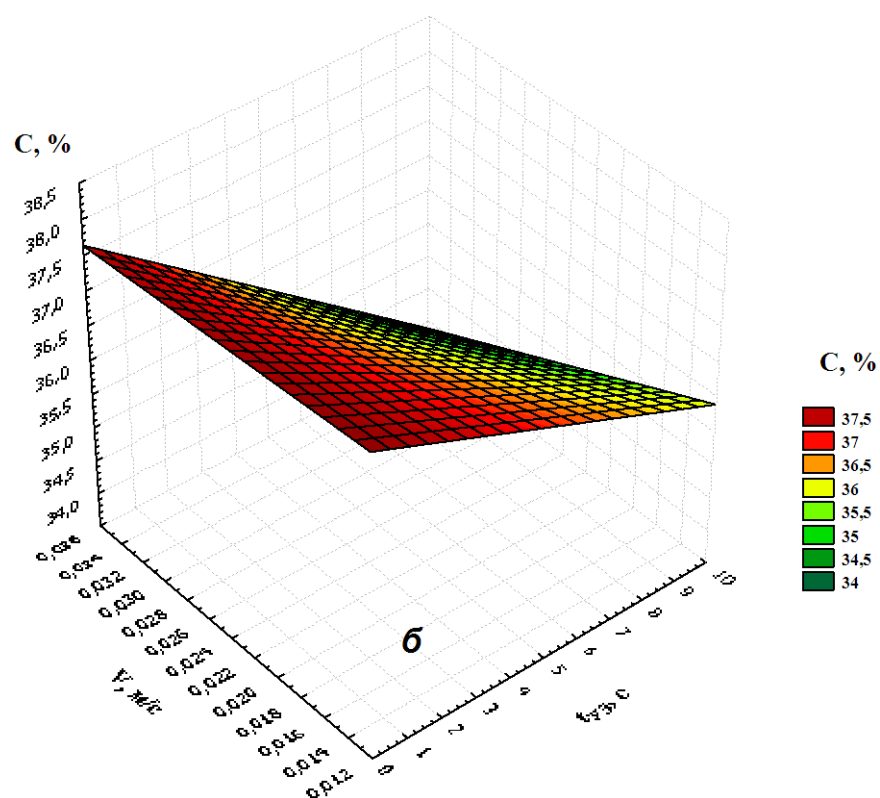
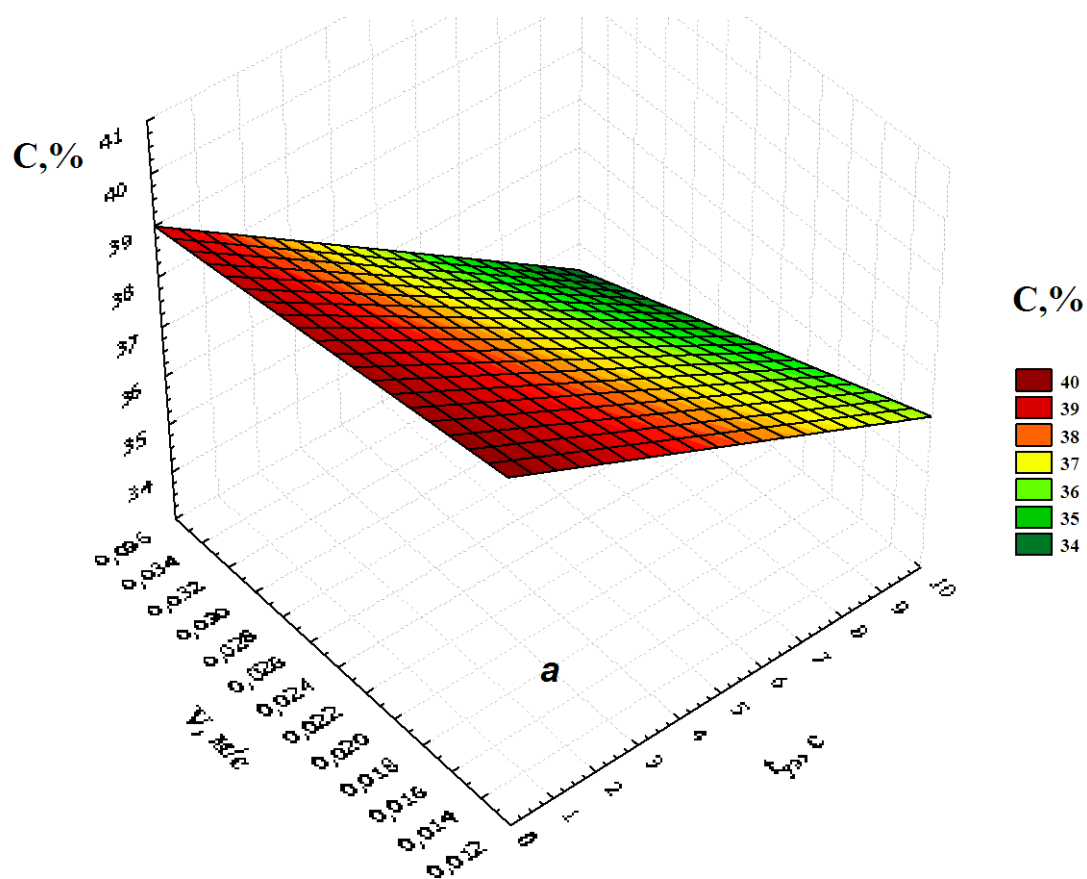


Рис. Ж.2, аркуш 1.

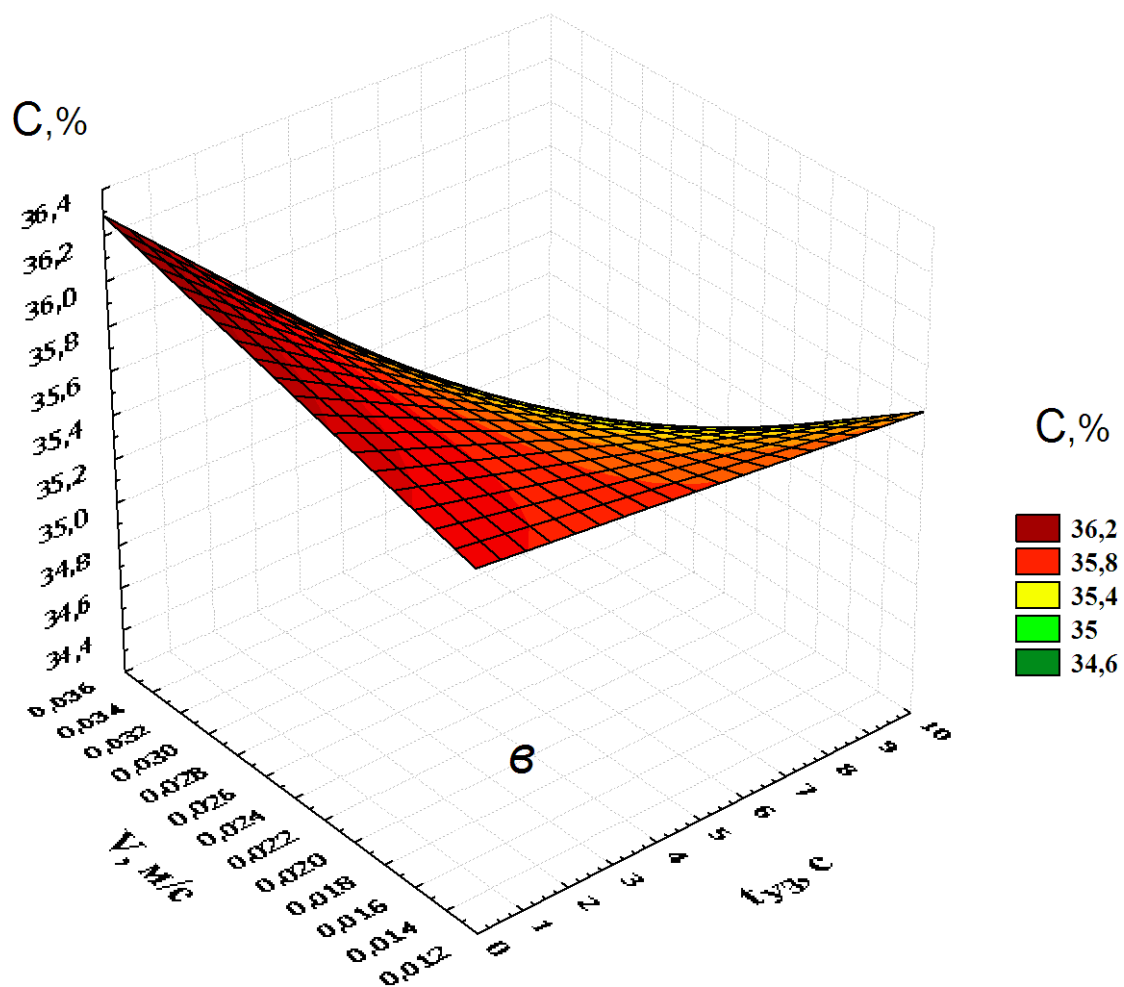


Рис. Ж.2, аркуш 2. Залежність величини нанесення $C, \%$, зв'язуючого ЕДТ-10 на склотканину ЕЗ-200 від часу ультразвукової обробки непросоченої склотканини $t_{uz}, \text{с}$, та швидкості протягування тканого матеріалу $V, \text{м/с}$, при частоті коливань f :

$$a - f = 18 \text{ кГц};$$

$$б - f = 20 \text{ кГц};$$

$$в - f = 22 \text{ кГц}.$$

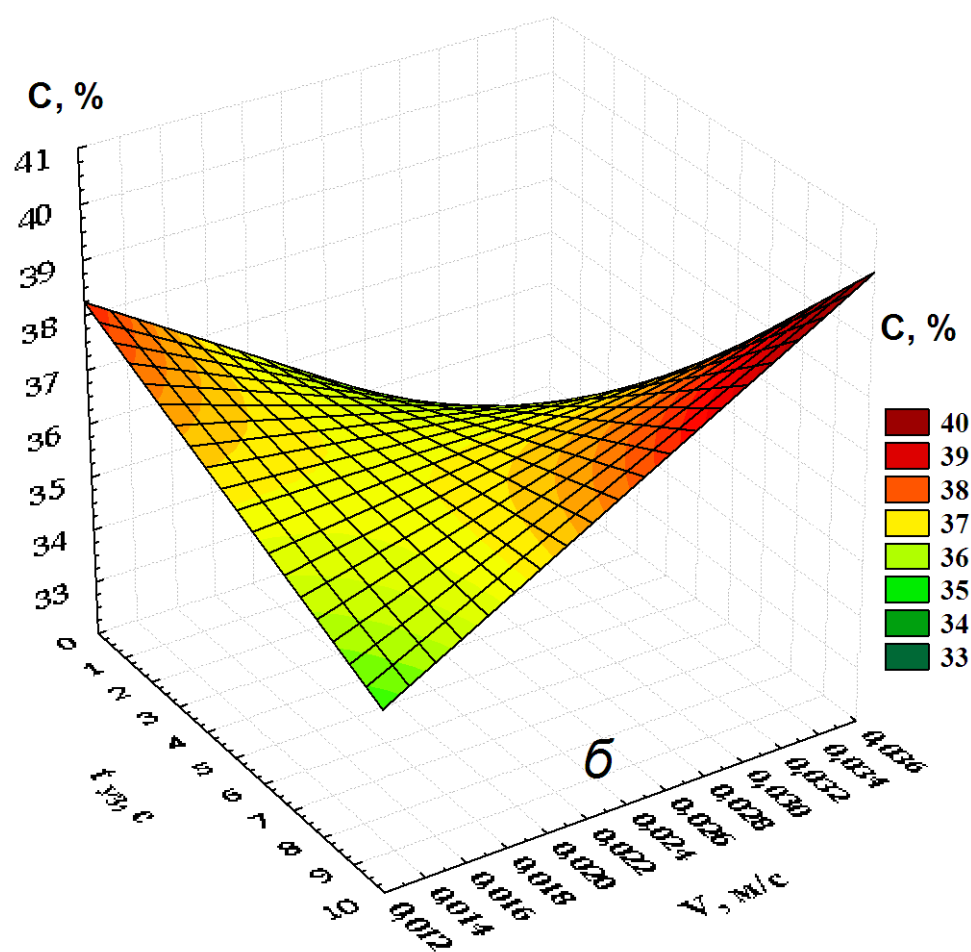
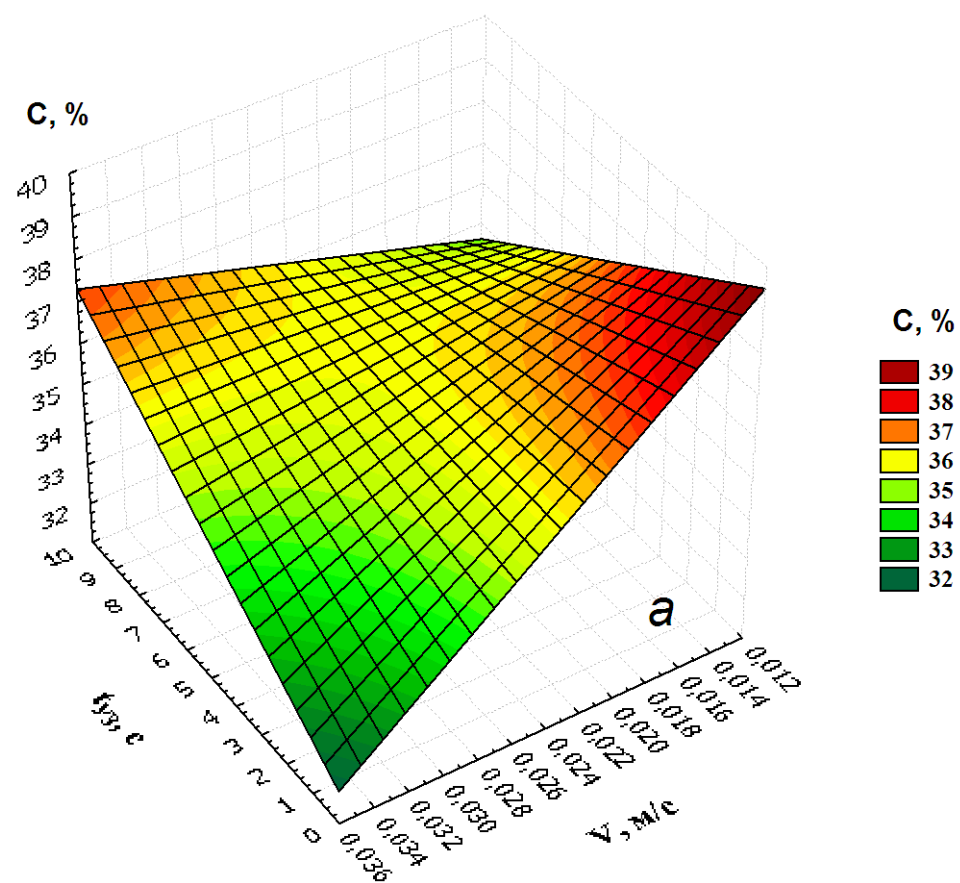
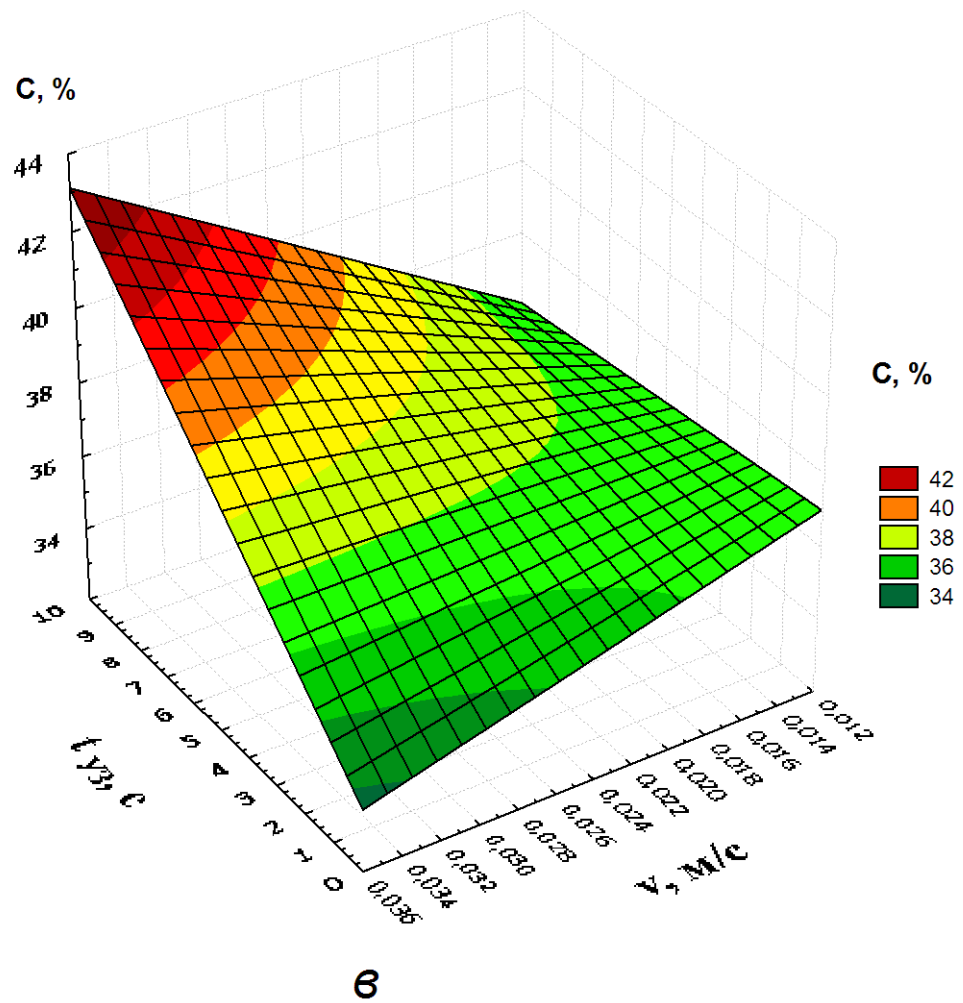


Рис. Ж.3, аркуш 1.



6

Рис. Ж.3, аркуш 2. Залежність величини нанесення C , %, зв'язуючого ЕДТ-10 на склотканину Т-10-80 від часу ультразвукової обробки непросоченої склотканини t_{uz} , с, та швидкості протягування тканого матеріалу V , м/с,

при частоті коливань f :

$$a - f = 18 \text{ кГц};$$

$$б - f = 20 \text{ кГц};$$

$$в - f = 22 \text{ кГц}.$$

ЗМІСТ

с.	
4	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....
5	ВСТУП.....
10	1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕПОКСИДНІ ПОЛІМЕРИ, ТЕХНОЛОГІЮ ОДЕРЖАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ОСНОВІ ТА УЛЬТРАЗВУКОВУ МОДИФІКАЦІЮ.
10	1.1. Загальні відомості про епоксидні полімери.....
11	1.2. Коротка класифікація і типові склади епоксидних з'єднань.....
13	1.3. Типовий технологічний цикл одержання орієнтованих волокнистих композиційних матеріалів.....
14	1.4. Методи модифікації рідких епоксидних композицій.....
14	1.4.1. Хімічна модифікація.....
15	1.4.2. Фізико-хімічна модифікація.....
15	1.4.3. Фізична модифікація.....
17	1.5. Аналіз ефективності ультразвукової модифікації рідких реактопластичних композицій.....
23	2. АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ РЕАКТОПЛАСТИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНО-ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ НА БАЗІ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....
23	2.1. Особливості проектування технології і устаткування для виробництва реактопластичних КВМ.....
24	2.2. Типовий технологічний цикл одержання намотувальних виробів з реактопластичних КВМ.....
26	2.2.1. Передумови до геометричного моделювання базового процесу «вільного» просочування
28	2.3. Перспективність застосування УЗ для базових процесів приготування полімерного зв'язуючого, просочування та дозованого нанесення.....
28	2.4. Аналіз ефективних засобів ультразвукової кавітаційної обробки з випромінюючою пластиною.....
30	2.5. Доцільність застосування методології структурно-параметричного геометричного моделювання для оптимізації технологічних процесів та обладнання.....
32	2.5.1. Адаптація базових принципів структурно-параметричного геометричного моделювання до вирішення задач проектування технологічного інструменту.....
34	2.6. Напрацювання дослідників з геометричного моделювання процесів та обладнання для одержання реактопластичних КВМ.....
	2.7. Особливості підходів до геометричного моделювання процесів та

обладнання для виготовлення реактопластичних КВМ.....	36
3. РОЗБИТТЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ІННОВАЦІЙНОГО ОДЕРЖАННЯ РЕАКТОПЛАСТИЧНИХ КВМ З ВИКОРИСТАННЯМ УЗ НА ОКРЕМІ СТРУКТУРНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА АНАЛІЗ ФОРМОУТВОРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЩО ВХОДЯТЬ ДО ЇХ СКЛАДУ.....	37
3.1. Узагальнена схема інноваційного одержання реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ.....	37
3.2. Розбиття схеми інноваційного одержання КВМ на окремі структуровані технологічні блоки.....	39
3.3. Технологія одержання реактопластичних КВМ із застосуванням УЗ як об'єкт структурно-параметричного геометричного моделювання.	40
3.3.1. Структурно-параметричне геометричне моделювання формоутворювальних елементів, що входять до блоку УЗ-обробки епоксидної смоли.....	41
3.3.2. Структурно-параметричне геометричне моделювання формоутворювальних елементів, що входять до блоку «вільного» просочування.....	45
3.3.3. Структурно-параметричне геометричне моделювання формоутворювальних елементів, що входять до блоку дозування.....	46
4. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ СТРУКТУРНО- ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ХВИЛЕВОДІВ ТА КОНЦЕНТРАТОРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	49
4.1. Конструктивно-технологічні особливості будови хвилеводів і концентраторів УЗ.....	49
4.2. Адаптація прийомів структурно-параметричного варіантного формоутворення для оптимізації конструкції хвилеводів і концентраторів.....	52
4.3. Геометричне моделювання простих акустичних концентраторів УЗ.....	53
5. ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАЗОВОГО ПРОЦЕСУ «ВІЛЬНОГО» ПРОСОЧУВАННЯ ОРІЄНТОВАНИХ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ РІДКИМИ ПОЛІМЕРНИМИ ЗВ'ЯЗУЮЧИМИ.....	60
5.1. Використання апарату теорії інтегральної геометрії та геометричних ймовірностей для геометричного моделювання мікроструктури орієнтованих волокнистих композитів	60
5.2. Геометрична модель мікроструктури орієнтованих композиційно- волокнистих матеріалів.....	63
5.2.1. Визначення параметрів геометричної моделі мікроструктури орієнтованих композиційно-волокнистих матеріалів.....	64
5.3. Порівняння результатів експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання розподілу довжин екстхорд	74
5.4. Комп'ютерне моделювання базового процесу «вільного»	

просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими...	75
5.4.1. Математичні співвідношення для визначення структурних параметрів адекватної геометричної моделі орієнтованих волокнистих наповнювачів	77
5.4.2. Методика моделювання параметрів базового процесу «вільного» просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими...	78
6. ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДЕНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДОЗУЮЧОГО КАВІТАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ З ПРЯМОКУТНОЮ ВИПРОМІНЮЮЧОЮ ПЛАСТИНОЮ.....	80
6.1. Схема розміщення елементів складеного ультразвукового дозуючого кавітаційного пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною.....	80
6.2. Удосконалена методика та алгоритм варіантного структурно-параметричного геометричного конструювання складеного ультразвукового дозуючого пристрою.....	83
6.2.1. Основні положення методики варіантного параметричного комп'ютерного конструювання складеного ультразвукового кавітаційного пристрою.....	84
6.3. Оптимізація конструкторсько-технологічних параметрів складеного ультразвукового дозуючого пристрою.....	89
6.4. Комп'ютерне варіантне 3D-конструювання складеного ультразвукового дозуючого пристрою.....	96
7. ПРАКТИЧНА АДАПТАЦІЯ МЕТОДОЛОГІЇ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ОДЕРЖАННІ РЕАКТОПЛАСТИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНО-ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ.....	103
7.1. Моделювання технологічних параметрів процесу озвучування рідких полімерних зв'язуючих.....	103
7.2. Моделювання кінетичних параметрів процесу поздовжнього просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими епоксидними зв'язуючими.....	106
7.2.1. Результати моделювання кінетичних параметрів процесу поздовжнього просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими епоксидними зв'язуючими.....	107
7.3. Моделювання конструктивно-технологічних параметрів складеного ультразвукового дозуючого пристрою.....	109
7.4. Порівняльний аналіз мікроструктури орієнтованих волокнистих наповнювачів, просочених рідкими епоксидними зв'язуючими за ультразвукової дії.....	111
ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ.....	114
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	117
ДОДАТКИ.....	131

ДОДАТОК А. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОЗВУЧУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ РІДКИХ ЕПОКСИДНИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ.....	131
А.1. Експериментально-статистична обробка результатів вимірювань і методика оптимізації технологічних параметрів озвучування рідких епоксидних зв'язуючих.....	131
А.2. Результати оптимізації технологічних характеристик епоксидних олігомерів і зв'язуючих на їх основі, що були піддані ультразвуковій обробці.....	135
ДОДАТОК Б. ПРОГНОСТИЧНЕ КІНЕТИЧНЕ РІВНЯННЯ ПРОЦЕСУ «ВІЛЬНОГО» ПРОСОЧУВАННЯ ОРІЄНТОВАНИХ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ РІДКИМИ ЕПОКСИДНИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ.....	139
Б.1. Типові схеми процесу «вільного» просочування.....	139
Б.2. Уточнене прогностичне кінетичне рівняння процесу «вільного» просочування.....	140
Б.3. Знаходження ефективного капілярного радіуса для випадку просочення тканих структур.....	144
ДОДАТОК В. МЕТОДИКА АНАЛІТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ РЕЗОНАНСНИХ АКУСТИЧНИХ РОЗМІРІВ СКЛАДАЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ ДОЗОВАНОГО НАНЕСЕННЯ РІДКИХ ЕПОКСИДНИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ НА ПРОСОЧЕНІ ТКАНІ ВОЛОКНИСТІ НАПОВНЮВАЧІ, ТА ВИЗНАЧЕННЯ КОНТРОЛЬОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКУ.....	147
В.1. Розрахункові рівняння складеного ультразвукового дозуючого пристрою.....	147
В.2. Послідовність практичної реалізації методики аналітичного розрахунку резонансних акустичних розмірів складеного ультразвукового дозуючого обладнання.....	154
В.3. Методика визначення контрольованих технологічних параметрів складеного кавітаційного апарату з випромінюючою пластиною.....	155
ДОДАТОК Д. ДОВІДКОВІ МАТЕРІАЛИ З ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСФОРМАТОРІВ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	157
Д.1. Використовувані оптимізуючі обмеження.....	157
Д.2. Використання методу експертних оцінок для оптимізації вибору конструктивно-технологічних параметрів концентраторів.....	157
ДОДАТОК Е. СПІВВІДНОШЕННЯ, ЩО ВИКОРИСТОВУВАЛИСЬ ПРИ ПРОВЕДЕННІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З ДЕТЕРМІНУВАННЯ РОЗПОДІЛУ ВІДСТАНЕЙ МІЖ СУСІДНІМИ КОЛАМИ В МОДЕЛЬНІЙ РЕШІТЧАСТІЙ ПЛОЩИНІ.....	165
ДОДАТОК Ж. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСАД, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ЕНЕРГООЩАДНІСТЬ ПРОЦЕСІВ ОБ'ЄМНОГО ОЗВУЧУВАННЯ, ПРОСОЧУВАННЯ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ І ДОЗОВАНОГО НАНЕСЕННЯ ЕПОКСИДНИХ	

ЗВ'ЯЗУЮЧИХ З ВИКОРИСТАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ.....	168
Ж.1. Особливості реалізації розроблених технологічних засад і обладнання для процесів просочування волокнистих наповнювачів та дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих із застосуванням УЗ-модифікації.....	168
Ж.2. Переваги розроблених технологічних засад для процесів просочування волокнистих наповнювачів і дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих на просочені волокнисті наповнювачі із застосуванням УЗ-модифікації.....	170
Ж.3. Оптимізація параметрів процесу дозованого нанесення епоксидних зв'язуючих на склоткані наповнювачі з використанням УЗ.....	173

Навчальне видання

Колосова Олена Петрівна
Ванін Володимир Володимирович
Колосов Олександр Євгенович
Сівецький Володимир Іванович

Ультразвукова обробка технологічної сировини полімерних композиційних матеріалів

Навчальний посібник

(електронне видання)

*В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника*